

Литература к главе I

§§ 1—2

- Амбарцумян В. А., Эволюция звезд и астрофизика, Изд. АН Армянской ССР, Ереван, 1947.
- Барабашев Н. П., Луна и планеты, Сб. «Астрономия в СССР за 30 лет», Гостехиздат, 1948, стр. 71—82.
- Берри А., Краткая история астрономии, Гостехиздат, 1946.
- Бруно Джордано, О бесконечности вселенной и мирах, Флоренция, 1584; русск. перев. А. И. Рубина. Сб. «Диалоги», Госполитиздат, 1949.
- Всехсвятский С. К., Исследование природы тел солнечной системы в Пулковской обсерватории, Изд. АН СССР, 1945, стр. 221—232.
- Галилей Галилео, Диалог о двух главнейших системах мира—птоломеевой и коперниковой, Флоренция, 1632; русск. перев. А. И. Долгова, Гостехиздат, 1948.
- Кларк А., Общедоступная история астрономии в XIX столетии, гл. VII—VIII. Изд. «Матезис», Одесса, 1913.
- Ломоносов М. В., Явление Венеры на Солнце наблюденное в Санкт-Петербургской Императорской Академии Наук мая 26 дня 1761 года. Изд. Академии наук, Санкт-Петербург, 1761; Соч., т. IV, 1955, стр. 361—376.
- Петрушевский Ф. Ф., План физического исследования поверхности Луны, Журн. русск. хим. о-ва и физ. о-ва 5, № 5, 1873, стр. 219—238.
- Фесенков В. Г., Космогония солнечной системы, Изд. АН СССР, 1944.
- Шаронов В. В., Планетоведение как научная дисциплина, Вестн. Ленингр. ун-та, 1949, № 8, 3—13.
- Шаронов В. В., Явление Ломоносова и его значение для астрономии, Астрон. журн. 29, № 6, 728—737, 1952.
- Шаронов В. В., Успехи советского планетоведения, Вестник АН СССР, 1953, 34—37.
- Шаронов В. В., К вопросу о приоритете М. В. Ломоносова в открытии атмосферы Венеры, Научн. бюлл. Ленингр. ун-та 33, 12—15, 1955.
- Шмидт О. Ю., Четыре лекции о теории происхождения Земли, Изд. АН СССР, 1950.
- Циолковский К. Э., Исследование мировых пространств реактивными приборами, Калуга, 1903.
- Graff K., Die physische Beschaffenheit des Planetensystems, Handbuch der Astrophysik, Bd. IV, Kap. 4, 358—425, Berlin, 1929.

§§ 3—5

- Куликов К. А., Фундаментальные постоянные астрономии, Гостехиздат, 1956.
- Михайлов А. А., Теория затмений, 2-е изд., Гостехиздат, 1954.
- Орлов А. Я. и Орлов Б. А., Курс теоретической астрономии, Гостехиздат, 1940.
- Путилин И. И., Малые планеты, Гостехиздат, 1953.
- Самойлова-Яхонтова Н. С., Обзор работ по малым планетам за 1947—1952 гг., Бюлл. Ин-та теоретич. астрон. 5, № 9 (72), 561—570, 1954; за 1953 г.—там же 6, № 1 (74), 1—7, 1955; за 1954 г.—там же 6, № 3 (76), 157—161, 1956; за 1955 г.—там же 6, № 7 (80), 429—433, 1957.
- Субботин М. Ф., Курс небесной механики, т. I, ОНТИ 1933.
- Субботин М. Ф., Теоретическая астрономия, Сборн. «Астрономия в СССР за 30 лет», Гостехиздат, 1948, стр. 50—70.
- Эфемериды малых планет на 1957 г. Изд. АН СССР, 1956, стр. 10—12.
- Sitter, de W., On the system of astronomical constants, Bull. Astron. Inst. Neetherlands 8, № 307, 213—231, 1938.

ГЛАВА II

ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТ И СПУТНИКОВ

§ 6. Телескоп как средство планетных исследований

Первый по времени и наиболее употребительный способ изучения поверхности планет и происходящих на них явлений состоит в визуальном наблюдении диска планеты при помощи телескопа с достаточно сильным увеличением. Цель такого наблюдения состоит в том, чтобы, внимательно взглядываясь в изображение планеты, рассмотреть на нем как можно больше деталей—мелких пятен и полос, областей различной яркости или различной окраски, зон с постепенным изменением яркости или цвета и т. п.

Три рода факторов кладут предел возможностям такого метода. Первые связаны с оптикой телескопа, вторые определяются свойствами нашего глаза и зрения, третьи определяются состоянием земной атмосферы, сквозь толщу которой выполняется всякое наблюдение небесного светила. В этом параграфе мы рассмотрим первую группу факторов.

Способность оптической системы давать отдельные изображения двух близких по угловому расстоянию объектов называется ее *разрешающей силой* или *разрешающей способностью*. Количественно она выражается тем минимальным угловым расстоянием δ_m , на котором два точечных объекта (например, компоненты двойной звезды) дают отдельные изображения, в то время как при меньшем угловом расстоянии получается одно слитное изображение. Поскольку исследование природы планет и спутников требует детального изучения очень малых по угловым размерам дисков или мельчайших деталей на более крупных дисках, высокая разрешающая способность является основным требованием, предъявляемым к телескопу, предназначенному для наблюдений планет. Можно сказать, что ни одна другая область астрономии не предъявляет в этом отношении столь высоких требований, как планетоведение. Поэтому главу о технике телескопического изучения планет мы начнем с того, что напомним читателю оптические явления, определяющие разрешающую способность телескопа.

Рассмотрим идеальный, т. е. свободный от всяких аберраций, телескопический объектив. Если со стороны пространства объек-

та в такой объектив вступает расходящийся гомоцентрический пучок лучей, то преобразованный объективом пучок в пространстве изображения тоже будет гомоцентрическим. Иными словами, изображение светящейся геометрической точки, образуемое таким объективом, будет тоже геометрической точкой.

Так, однако, обстоит дело только до тех пор, пока задача решается в рамках геометрической оптики. Волновая природа света изменяет это положение и приводит к тому, что в фокальной плоскости идеального объектива вместо точки образуется сложная дифракционная картина. В центре этой картины помещается яркий

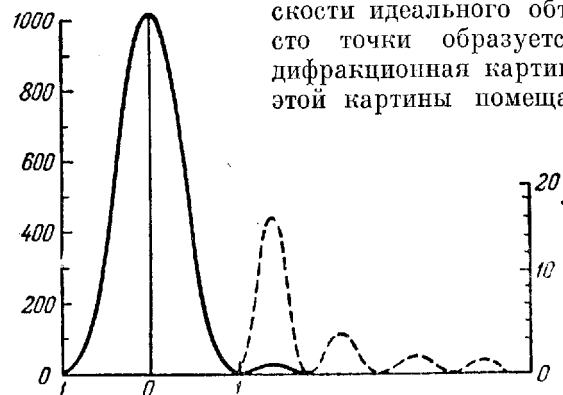


Рис. 3. Распределение света в дифракционной картине для точечного изображения. Левая шкала относится к сплошной линии, правая — к пунктирной. (По Д. Д. Максутову.)

кружок конечного радиуса r , называемый *дифракционным диском*. Яркость в нем наибольшая в центре, т. е. в точке геометрического изображения точечного объекта, и плавно снижается до нуля к краям. Вокруг кружка располагается значительно менее яркое дифракционное кольцо, отделенное от диска темным промежутком, за ним следует еще менее яркое второе кольцо, далее — третье. Теоретически число таких колец бесконечно велико, однако яркость быстро уменьшается с номером кольца, а потому практически в телескоп бывает видно вокруг изображения звезды всего три, редко четыре кольца. Их размеры и яркость теоретически выражаются такими данными:

Объект	Расстояние от центра картины (за единицу принят радиус первого темного кольца)	Яркость (произвольные единицы)	% световой энергии
Дифракционный диск	0	10 000	83,8*)
I кольцо	1,342	175	7,2
II кольцо	2,202	42	2,8
III кольцо	3,042	16	1,5

*) По всему диску.

Схематически распределение яркости вдоль радиуса дифракционной картины представлено на рис. 3.

В теории дифракции устанавливается, что радиус r дифракционного диска зависит от длины волны λ излучения и от относительного отверстия объектива D/F (D — диаметр входного зрачка, F — главное фокусное расстояние):

$$r = 1,219 \lambda \frac{F}{D}. \quad (1)$$

В табл. 4 приводятся значения r при разных D/F , вычисленные для трех участков спектра: голубого ($\lambda=486$ м μ), зеленого ($\lambda=555$ м μ) и красного ($\lambda=656$ м μ).

Таблица 4

Линейный радиус r дифракционного изображения точки (звезды) в зависимости от относительного отверстия объектива D/F для синих, зеленых и красных лучей

$\frac{D}{F}$	Синие лучи $\lambda=486 \text{ м}\mu$	Зеленые лучи $\lambda=555 \text{ м}\mu$	Красные лучи $\lambda=656 \text{ м}\mu$	Δ_1 для $\lambda=555 \text{ м}\mu$ (в микро- нах)
	r (в микронах)			
1 : 1	0,6	0,7	0,8	4
1 : 2,5	1,5	1,7	2,0	28
1 : 5	3,0	3,4	4,0	111
1 : 10	5,9	6,8	8,0	444
1 : 25	14,8	16,9	20,0	2 780
1 : 50	29,6	33,8	40,0	11 100
1 : 100	59,3	67,7	80,0	44 400

Для астрономических наблюдений интереснее рассматривать не линейный радиус дифракционного диска, а угловой. Последний равен углу α , под которым из второй главной точки объектива виден радиус r :

$$\alpha = \frac{r}{F} = 1,22 \frac{\lambda}{D}. \quad (2)$$

Из этого следует, что угловая разрешающая способность не зависит от фокусного расстояния и определяется только отверстием объектива D . Если взять $\lambda=555$ м μ (середина видимого спектра) и выразить α не в радианах, а в дуговых секундах, то

$$\alpha'' = \frac{140''}{D}, \quad (3)$$

где D выражено в миллиметрах. Значения α , вычисленные по этой формуле, приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Угловой радиус дифракционного изображения точки (звезды) в зависимости от диаметра D входного отверстия телескопа для зеленых лучей ($\lambda=555$ мμ)

D (мм)	α	D (мм)	α
25	5",6	200	0",70
35	4,0	250	0,56
50	2,8	350	0,40
70	2,0	500	0,28
100	1,4	700	0,20
140	1,0	1000	0,14

Итак, основное требование, предъявляемое к телескопу с точки зрения наблюдения планетных деталей,—это большое отверстие объектива. Однако до сих пор мы говорили об идеальном объективе и, кроме того, имели в виду картину, получаемую точно в главном фокусе этого объектива. При переходе к реальным условиям обстоятельства могут измениться.

Во-первых, на практике окуляр телескопа не может быть установлен на фокус идеально точно. С точки зрения геометрической оптики это поведет к тому, что изображение точки превратится в кружок, называемый *внефокальным диском* и представляющий собою сечение конуса пучка лучей, идущего от объектива, фокальной плоскостью окуляра. Если расстояние последней от главной плоскости объектива обозначить через Δ , то радиус r_v внефокального диска будет:

$$r_v = \frac{1}{2} \Delta \frac{D}{F}. \quad (4)$$

В действительности такой диск будет наблюдаться только при больших смещениях с фокуса. При малых Δ будет происходить сложная трансформация дифракционной картины, которая в основном сводится к следующему. С увеличением Δ дифракционные кольца становятся шире и ярче, а яркость центрального дифракционного диска уменьшается. При

$$\Delta = \Delta_1 = 8\lambda \frac{D^2}{F^2} \quad (5)$$

яркость в центре оказывается равной нулю, т. е. изображение точки превращается в систему концентрических колец. Вычисленные по этой формуле значения Δ_1 приведены в табл. 4. При дальнейшем увеличении Δ в центре опять появляется сгусток света, яркость которого, однако, меньше яркости дифракционного диска,

а при

$$\Delta = 16\lambda \frac{D^2}{F^2}$$

центр снова делается темным. Вместе с тем промежутки между кольцами все более замыкаются светом. Изображение превращается в диск большого диаметра, составленный из концентрических колец большей и меньшей яркости. Различие в яркости между этими кольцами с увеличением Δ снижается, и при достаточно большом Δ диск становится однородным—случай, соответствующий формуле (4).

Во-вторых, во всякой реальной оптической системе существуют aberrации. Если рассматривать монохроматическое изображение, находящееся на оптической оси, то в расчет надо принимать только сферическую aberrацию. Ее действие заключается в перераспределении света в идеальной дифракционной картине, описанной выше: яркость дифракционного диска снижается и за счет этого увеличивается яркость колец, а, кроме того, заполняются светом промежутки между кольцами. Таким образом, дифракционная картина размывается и расплывается, а при достаточно сильном действии aberrации совсем исчезает, в результате чего изображение точки принимает вид бесструктурного расплывчатого пятна. Последнее называют *абберационным диском* или *кружком рассеяния*.

Аберрации косых лучей: кома, кривизна поля, дисторсия и астигматизм, при наблюдении планет не имеют большого значения поскольку планетные диски малы по угловым размерам и их всегда можно рассматривать на оптической оси объектива. Исключение составляет Луна с ее довольно крупным диском, но и для нее, изучая мелкие детали поверхности, всегда можно довольствоваться резкими изображениями в центре поля зрения.

Поскольку на практике мы имеем дело не с монохроматическим, а со смешанным лучистым потоком, большую роль играет хроматизм. Уже идеальная дифракционная картина сильно изменяется этим фактором, поскольку ее масштаб зависит от длины волны λ , и потому диск и кольца, соответствующие разным частям спектра, между собой не совпадают. Это ведет к появлению красной каймы у дифракционного диска и радужной окраски у колец, что имеет место как у рефракторов, так и у рефлекторов. У рефлекторов к этому добавляется хроматическая aberrация, которая не только вносит добавочную окраску в дифракционную картину, но и значительно «размывает» последнюю, превращая в некоторых случаях изображение точки в сплошное пятно с радужными краями.

Все явления, определяемые дифракцией для точечного изображения, реально наблюдаются в поле зрения телескопа при достаточно сильном увеличении в случае наблюдения звезды. Резкость и правильность дифракционной картины—центрального диска, окруженного кольцами,—являются одним из простейших крите-

риев для суждения о качестве объектива или зеркала в смысле умеренности aberrаций. При наблюдении протяженного объекта, каким является планетный диск, дифракция и aberrации проявляют себя, естественно, в ином виде.

Рассмотрим прямолинейный край протяженного равномерно яркого объекта, проектирующийся на совершенно черном фоне. Действительный ход яркости для такой модели представлен на рис. 4 сплошной черной линией; при $x=0$ имеется резкая ступень. Иначе будет обстоять дело для образованного объективом изображения: дифракция исказит действительный ход яркости. Для того

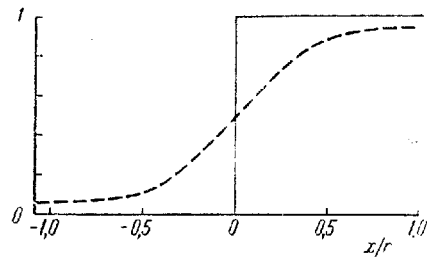


Рис. 4. Ход яркости у границы протяженного изображения, определяемый дифракцией. (По Д. Д. Максудову.)

чтобы выяснить этот вопрос, мы должны мысленно разбить прилегающую к краю часть площади объекта на отдельные точки, для каждой точки построить дифракционную картину и для каждой точки изображения подсчитать яркость, образующуюся в результате взаимного наложения дифракционных картин от бесчисленного множества соседних точек.

Такого рода расчеты были выполнены О. Струве, Нагасаки, а в последнее время Д. Д. Максудовым, применившим для этого графический метод. Теория методики расчета выходит за рамки нашего изложения, и мы ограничимся только некоторыми выводами. Ход яркости у края, получаемый в первом приближении, представлен на рис. 4 пунктирной кривой. Мы видим, что эффект дифракции сводится к тому, что часть света выносится за границу идеального изображения, и потому вместо скачка хода яркости на краю мы получаем плавный переход от яркого поля к темному. Яркость изображения на самом краю равна половине истинной яркости светлого поля. Ветви кривой, согласно которым яркость от края растет в сторону яркого поля и снижается в сторону темного, взаимно симметричны; обе они асимптотически приближаются к яркостям соответствующих полей, практически же их достигают уже на расстоянии порядка диаметра дифракционного диска.

Из сказанного следует, что, рассматривая резкий край светлого объекта, например диска Луны, при сильном увеличении, наблюдатель увидит его не резким, а несколько размытым, причем зона плавного перехода к фону неба будет иметь ширину порядка диаметра дифракционного диска.

Если объект представляет собою очень узкую полосу, ширина которой меньше диаметра дифракционного диска, то зоны размы-

тости, получаемые у обоих краев полосы, смыкаются, в результате чего получается резкий максимум яркости на середине полосы, который, однако, меньше истинного значения яркости. Чем меньше ширина полосы, тем ниже яркость в максимуме. Ход истинной и наблюдаемой яркостей для разных значений ширины полосы представлен на рис. 5 (сверху).

Аналогичную картину дает узкая черная полоса на светлом фоне. Благодаря дифракции ее изображение тоже размывается, вследствие чего в центре получается некоторая остаточная яркость, тем большая, чем меньше ширина полосы. Кривые распределения яркости, показанные на рис. 5, оказываются симметричными по отношению к тому, что мы имели для случая светлой полосы.

Аналогичную картину дает узкая черная полоса на светлом фоне. Благодаря дифракции ее изображение тоже размывается, вследствие чего в центре получается некоторая остаточная яркость, тем большая, чем меньше ширина полосы. Кривые распределения яркости, показанные на рис. 5, оказываются симметричными по отношению к тому, что мы имели для случая светлой полосы.

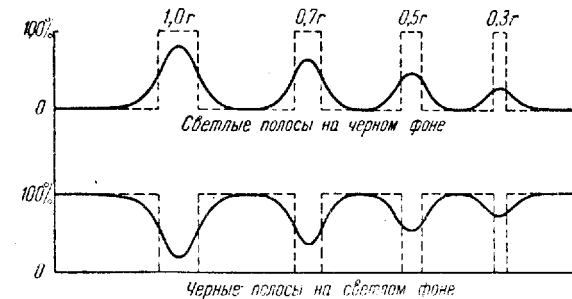


Рис. 5. Распределение интенсивности для изображения узкой полосы. Истинный контур изображен пунктиром; контур, измененный дифракцией, — сплошной линией; r — радиус дифракционного диска согласно (1). (По Д. Д. Максудову.)

Большой интерес для планетоведения представляет случай очень маленького диска, диаметр изображения которого одного порядка с диаметром дифракционного диска. Такими объектами являются наиболее крупные из спутников и астероидов. В этом случае дифракция превращает изображение резкого диска в размытое пятно с нерезкими краями и монотонным ростом яркости к центру, причем максимум яркости в самом центре изображения ниже истинной яркости диска. Аналогичную, но обратную картину даст черная точка на светлом фоне, которую эффект дифракции превращает в расширенное бледное пятно размытых очертаний.

При более точном расчете дифракции выясняется, что пунктирная линия на рис. 4, равно как и кривые на рис. 5, имеют несколько волнообразный ход. Это ведет к тому, что у границы яркого поля, а также по обеим сторонам яркой или черной полосы появляются параллельные краю изображения чередующиеся темные и светлые полосы. То же получится и для небольшого круглого диска: у его края намечаются светлые и темные кольца.

Если сферическая и хроматическая aberrации, а также дефокусировка значительны, то их действие дает картину, вполне аналогичную рассмотренной выше, но зона размытости расширяется пропорционально диаметру кружка рассеяния. Соответственно этому снижается и разрешающая сила телескопа.

Кроме разрешающей силы, для планетных наблюдений известное, хотя и меньшее значение имеет визуальная светосила телескопа. Под термином *визуальная светосила* мы будем понимать отношение S субъективно воспринимаемого наблюдателем ощущения яркости b_T поверхностного объекта при его рассматривании при помощи телескопа к тому ощущению яркости b_r , которое получается при рассматривании того же объекта невооруженным глазом:

$$S = \frac{b_T}{b_r}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что для невооруженного глаза объект, имея достаточные угловые размеры, представляется в виде площадки, а не звезды. В этом случае ощущение яркости b_r будет пропорционально фотометрической яркости объекта B и квадрату диаметра зрачка глаза d_r (точнее, квадрату диаметра входного отверстия оптической системы глаза):

$$b_r = cB d_r^2. \quad (7)$$

В случае наблюдения телескопом необходимо принимать во внимание диаметр так называемого окулярного зрачка, т. е. зрачка выхода телескопической системы d_T . Последний, как известно, равен диаметру входного отверстия D , деленному на увеличение телескопа U :

$$d_T = \frac{D}{U}. \quad (8)$$

Ощущение яркости b_T , воспринимаемое при наблюдении через телескоп, выражается общей формулой:

$$b_T = c\tau B d^2, \quad (9)$$

где τ — коэффициент пропускания для оптической системы телескопа; что же касается параметра d , то при $d_T > d_r$ его надо полагать равным d_r , а при $d_T < d_r$ — равным d_T . Граница между этими двумя случаями соответствует такому увеличению $U_m = D/d_r$, при котором $d_T = d_r$ и которое называют *равнозрачковым* или *нормальным*, а иногда также и *минимальным*. Последнее наименование надо понимать в том смысле, что это наименьшее увеличение, при котором объектив данного телескопа используется полностью, поскольку при меньших увеличениях часть объектива диафрагмируется проекцией зрачка глаза и действующее отвер-

стие оказывается равным не D , а Dd_r/d_T , что, однако, не влечет за собой каких-либо отрицательных последствий, поскольку дифракционная картина при столь малых увеличениях все равно не видна.

При $U < U_m$ изменение увеличения не отзывается на воспринимаемой яркости b_T ; при $U > U_m$ яркость b_T снижается обратно пропорционально квадрату увеличения U . Действительно, из равенств (8) и (9) следует

$$b_T = c\tau \frac{D^2}{U^2} B. \quad (10)$$

Из сказанного получаем два выражения для светосилы:

при $U < U_m$

$$S = \tau; \quad (11)$$

при $U > U_m$

$$S = \tau \frac{D^2}{d_r^2} \frac{1}{U^2}. \quad (12)$$

Расчет абсолютных значений S по формуле (12) осложняется неопределенностью величины d_r : как известно, зрачок глаза не только различен у разных людей, но и у одного наблюдателя в зависимости от яркости рассматриваемого объекта d_r может меняться в пределах от 1,5 до 8 мм. Поскольку планеты имеют значительную истинную яркость B , мы можем для них принять $d_r = 2,5$ мм. Значения U_m и S , вычисленные с этим значением при $\tau = 0,5$, приводятся в табл. 6.

Таблица 6

Светосила S при разном диаметре объектива D и увеличении U

D (мм) \ U	25	50	100	250	500	1000	2500
25	0,080	0,320	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
50	0,020	0,080	0,320	0,500	0,500	0,500	0,500
100	0,005	0,020	0,080	0,500	0,500	0,500	0,500
200	—	0,005	0,020	0,125	0,500	0,500	0,500
500	—	—	0,003	0,020	0,080	0,320	0,500
1000	—	—	—	0,005	0,020	0,080	0,500
2000	—	—	—	—	0,005	0,020	0,125
U_m	10	20	40	100	200	400	1000
U_n	50	100	200	500	1000	2000	5000

Возрастание увеличения U сопровождается повышением разрешающей силы только до известного предела — такого увеличения, при котором становится ясно видимой дифракционная картина.

Поскольку детали наблюдаемого объекта, изображения которых равны или меньше дифракционного диска, не могут быть различены данным телескопом, при более сильных увеличениях новых деталей появляться уже не будет. Вместе с тем видимость объекта будет ухудшаться за счет снижения яркости, уменьшения поля зрения, расширения всякого рода зон размытости и подобных факторов. Поэтому для всякого объектива существует некоторое предельное увеличение, сверх которого улучшение видимости деталей сменяется ухудшением.

Опыты показывают, что дифракционная картина становится полностью видимой при увеличении, которому соответствует зрачок выхода d_z порядка 0,5—0,7 мм. Отсюда следует, что предельное увеличение U_n выражается формулой

$$U_n = \frac{D}{0,5} \quad (13)$$

Вычисленные по этой формуле значения U_n приведены в табл. 6.

Из других качеств телескопа, существенных для наблюдений планет, отметим необходимость отсутствия всякого рода постороннего света, проявляющего себя в образовании разного рода ореолов и бликов. Источники такого рода паразитического света разнообразны; к ним следует отнести рассеяние света в стеклах объектива и окуляра, отражения от стенок трубы, рассеяние в воздухе, заполняющем трубу, и, наконец, многократные отражения в оптике, дающие как обширные внефокальные изображения, так и резкие фокальные блики. Все эти помехи особенно дают себя чувствовать при наблюдении темного объекта, примыкающего к светлomu. В сложных оптических системах с большим числом отражающих поверхностей яркость паразитического света, заливающего все поле зрения, может составлять до половины яркости изображения светлого объекта. Сокращение числа свободных поверхностей путем склейки всех деталей, для которых это возможно, и применение просветления в отношении остающихся поверхностей могут значительно снизить это нежелательное явление.

Что касается до выбора системы телескопа, то тут трудно дать определенные указания. Длительная дискуссия, происходившая в астрономии в XVIII и XIX вв. о преимуществах рефракторов и рефлекторов, касалась и наблюдений деталей на планетных дисках. Дискуссия эта осталась незаконченной, и это указывает на то, что в деле различения мелких по угловым размерам деталей упомянутые типы телескопов примерно равноценны. Теоретически рефлекторы несомненно имеют некоторые преимущества перед рефракторами, причем на первое место тут надо поставить отсутствие хроматической аберрации. Но на практике рефлекторы часто не дают столь высокого качества изображений, какое от них ожидают. Это объясняется отчасти тем, что зеркало в гораздо большей

мере подвержено деформациям вследствие изменений температуры, действия силы тяжести и других причин, чем объектив. В связи с этим особый интерес приобретает возможность создания специального планетного телескопа по схеме менисковых телескопов системы Д. Д. Максудова.

§ 7. Свойства зрения

Телескоп применяется в сочетании с глазом, оптические и световоспринимающие свойства которого имеют для результата наблюдения важнейшее значение. Напомним, что оптическая система глаза, состоящая из ряда прозрачных сред с различными значениями показателя преломления, проектирует рассматриваемое изображение на внутреннюю поверхность глазного яблока, которая покрыта светочувствительным слоем, называемым *сетчатой оболочкой* или *ретиной*. Этот слой составлен из отдельных световоспринимающих элементов двух типов. Первый тип составляют *колбочки*, имеющие округлую форму и реагирующие на яркий свет; ими же осуществляется восприятие цвета. Второй тип образуют удлинённые *палочки*, воспринимающие слабый свет и ощущение цвета не дающие. Колбочки составляют аппарат *дневного зрения*, палочки—аппарат *сумеречного* или *ночного зрения*.

Уже зернистое строение ретины само по себе определяет пределы возможности восприятия малых по угловым размерам объектов. Очевидно, что деталь, размеры изображения которой на ретине меньше размера колбочек, не может быть рассмотрена. В действительности группы по несколько колбочек и палочек, будучи соединены с одним нервом, действуют как одна световоспринимающая ячейка, что еще суживает пределы воспринимаемого. В том же направлении действует и дифракция оптической системы глаза. Расчет даст для диаметра дифракционного диска 0,003 мм, в то время как размеры колбочек в части ретины, соответствующей оптической оси глаза (*центральная ямка*), составляют 0,002—0,005 мм.

На практике разрешающую способность глаза выражают *остротой зрения* s , под которой понимают величину, обратную минимальному угловому поперечнику δ_n , при котором черный объект виден на белом фоне:

$$s = \frac{1}{\delta_n} \quad (14)$$

где δ_n выражено в угловых минутах. Таким образом, за единицу принимается такая острота зрения, при которой черный круг на белом фоне виден при $\delta_n > 1'$, и не виден при $\delta_n < 1'$, что в общем соответствует зрению среднего качества. При повышенной остроте угловой порог δ_n снижается до 20—10", при пониженной он

повышается до 3—5'. Следует иметь в виду, что минимально воспринимаемый угол δ_n сильно зависит от условий наблюдения и, в частности, от яркости фона, а также от формы объекта. Белый промежуток между двумя черными фигурами исчезает примерно при том же значении δ_n , что и одиночный черный объект, но узкая длинная черная линия воспринимается при гораздо меньшей угловой ширине: для нее δ_n , отнесенное к ее поперечнику, для среднего глаза составляет 5—10", а при повышенной остроте может доходить до 1—2".

Все сказанное относилось к случаю темного объекта на светлом фоне. В случае очень яркого объекта на черном фоне условия зрительного восприятия будут совершенно другие, так как в этом случае мы будем иметь точечный источник света, воспринимаемый в качестве звездообразного изображения. Видимость такого объекта уже не зависит от его угловых размеров, но определяется блеском, т. е. освещенностью, получаемой от источника в глазу наблюдателя.

Объект больших угловых размеров воспринимается зрением в том случае, если он по яркости или по цвету достаточно отличается от окружающего фона; если же различие по яркости и цвету ниже необходимого минимума, то объект для зрения сливается с фоном в сплошное поле равномерной яркости и становится неразличим. В соответствии с этим возможность различить некоторую деталь на диске планеты определяется общими законами, выражающими видимость различных объектов и относящимися к области физиологической оптики. Для интересующей нас здесь частной задачи важно следующее.

Пусть объект, имеющий яркость B_1 , находится на фоне того же цвета, имеющем яркость B_2 , причем $B_1 > B_2$. Величину

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_1} \quad (15)$$

называют *контрастом яркости* данного объекта. Степень видимости последнего определяется величиной контраста. Согласно психофизиологическому закону Вебера—Фехнера, объект распознается глазом в том случае, если контраст K превосходит некоторое определенное значение, называемое *порогом контрастной чувствительности* зрения или *фехнеровской дробью* и обозначаемое ϵ . Таким образом, объект виден при $K > \epsilon$ и не виден при $K < \epsilon$.

При оптимальных условиях наблюдения ϵ получается близким к 1%. По данным Н. Н. Сытинской, исследовавшей зрение большого числа наблюдателей, среднее значение этого параметра равно 1,5%, что и было принято при составлении многих таблиц для расчета видимости далеких предметов. Но при таком значении контраста объект, находясь на границе между видимостью и невидимостью, практически зрением уже не восприни-

мается. Поэтому при расчете тех условий, при которых объект реально можно различить, следует принимать большее ϵ , например часто используемое на практике значение 2% или даже, как это утверждает Н. Г. Болдырев, 5%.

Закон Вебера—Фехнера, согласно которому порог контрастной чувствительности является постоянной величиной, оправдывается лишь при некоторых определенных условиях. За пределами этих условий порог ϵ становится переменной величиной, и учет этих его изменений составляет важнейшую задачу учения о видимости.

Условия, в которых порог контрастной чувствительности может считаться постоянным и равным тем минимальным значениям ϵ_0 , которые были приведены выше, сводятся к нижеследующему.

1. Достаточно большие видимые размеры объекта, определяемые угловым поперечником δ не ниже 1—2°. Если угловые размеры объекта, последовательно уменьшаясь, переходят за 1°, то начинается увеличение ϵ , сначала медленное, потом все более быстрое. Кривая зависимости ϵ от δ , представленная на рис. 6, имеет вид гиперболы, одна ветвь которой асимптотически приближается к минимальному значению $\epsilon = \epsilon_0$, а другая уходит в бесконечность около $\delta = 1'$. Поскольку задача планетных наблюдений состоит в выявлении мельчайших деталей диска, эта зависимость имеет важнейшее значение.

2. Умеренная яркость наблюдаемого объекта. Зрение человека приспособлено для работы в условиях дневного освещения, а потому условие $\epsilon = \epsilon_0$ осуществляется в широком диапазоне яркостей в пределах примерно

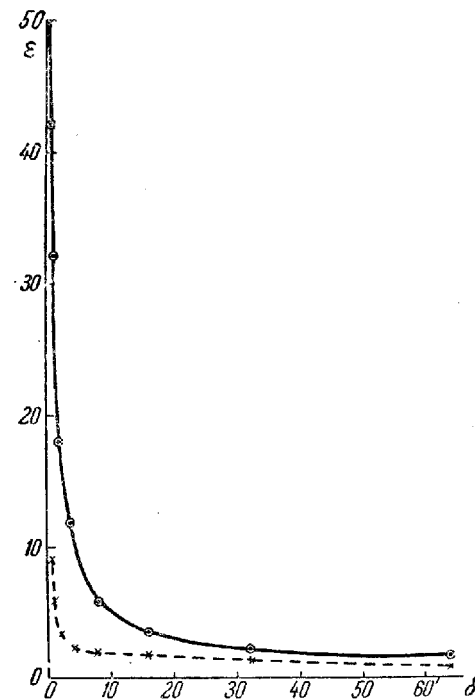


Рис. 6. Зависимость порога контрастной чувствительности зрения (в %) от углового размера объекта: сплошная линия—черный круг на белом фоне, пунктир—длинная черная полоса на белом фоне. (По Н. Н. Сытинской.)

от 0,3 до 0,003 *сб*, чему соответствует яркость природного ландшафта при различных условиях естественного дневного освещения. Этому же интервалу яркостей соответствуют и диски планет. Если же яркость выходит за пределы указанного интервала, то начинается прогрессирующий рост ϵ . При яркостях, лежащих за верхней границей оптимального интервала, это сопровождается неприятным ощущением ослепления или неудобства, связанного с тем, что чрезмерно яркий свет «режет глаза» — явление, называемое в физиологической оптике *блескостью* или *слепимостью*. Переход к яркостям, лежащим ниже оптимального интервала, неприятного ощущения не вызывает, однако и тут происходит прогрессивный рост контрастного порога, обуславливающий плохую видимость окружающего в ночных условиях. При достаточно малом значении яркости $B = B_A$ кривая зависимости ϵ от яркости уходит в бесконечность. Это значение B_A , очевидно, представляет собою яркость, для глаза не отличимую от полной темноты. Его называют *абсолютным порогом восприятия* яркости; оно составляет около 10^{-9} *сб*.

Как уже было указано, диски планет, будучи объектами, освещенными Солнцем, в отношении действительной яркости лежат в пределах оптимального интервала. Но при наблюдении в телескоп с сильным увеличением видимая яркость снижается столь значительно, что это может сказаться на значении контрастного порога. Значительные изменения порога всегда имеют место при наблюдении таких объектов, как пепельный свет Луны и лунный диск, погруженный в земную тень.

3. Адаптация глаза, соответствующая наблюдаемой яркости. Напомним, что явление *адаптации* состоит в способности зрения приспособляться к наличному уровню света. Этой способностью, например, объясняется тот факт, что в пасмурный день мы совершенно не воспринимаем изменений естественной освещенности с высотой Солнца, хотя они достигают очень больших значений (в пределах ста раз и больше). Механизм адаптации складывается из ряда различных процессов, к числу которых относятся: изменение отверстия зрачка глаза, переход от восприятия света колбочками к восприятию палочками, разрушение родопсина — вещества, играющего важную роль в акте зрения, перемещение зерен черного пигмента, содержащихся в ретине и частично экранирующих светочувствительные элементы, изменение чувствительности центральной нервной системы. Процесс адаптации требует времени, причем *световая адаптация*, т. е. перестройка глаза со слабого света на сильный, происходит быстро и завершается за несколько минут, в то время как обратный процесс *темновой адаптации*, т. е. перестройки на слабый свет, идет медленно и оказывается далеко не законченным даже по прошествии часа. Неполная адаптация

к уровню рассматриваемой яркости ведет к заметному повышению контрастного порога и соответствующему ухудшению видимости деталей. Отсюда следует общеизвестное правило: беречь глаза от яркого света при наблюдении темных объектов. При наблюдениях планет чаще бывает, что наблюдения страдают из-за того, что яркость объекта оказывается чрезмерной для глаза наблюдателя, адаптированного к слабому ночному освещению башни телескопа. Общеизвестно, например, что диск Луны, рассматриваемый при помощи телескопа ночью, дает эффект блескости, хотя его яркость такая же, что и у дневного ландшафта, т. е. близкая к оптимальной.

С адаптацией связано явление *последовательного яркостного контраста*. Оно состоит в том, что если после наблюдения яркого объекта перевести взор на темный объект, то последний кажется темнее, чем в том случае, когда предварительного рассматривания яркого объекта не было. Точно так же светлый объект кажется ярче, чем в действительности, если перед ним рассматривался объект низкой яркости.

4. Равномерная яркость всего поля зрения. Наличие в поле зрения посторонних объектов слишком большой яркости создает эффект ослепления и этим, естественно, ухудшает видимость менее ярких деталей. Однако опыты показывают, что и черные объекты (в частности, черный фон вокруг яркого объекта) тоже увеличивают контрастный порог. Это можно объяснить тем, что при наличии в поле зрения ярких и темных объектов одновременно зрение адаптируется на некоторую промежуточную яркость, в отношении которой светлые объекты слишком ярки, темные — недостаточно ярки, так что ни для тех, ни для других не выполняется условие соответствия адаптации рассматриваемой яркости. Опыты, в которых исследовалось влияние яркости фона на воспринимаемость деталей видимого на этом фоне объекта, показывают, что минимальное значение порога достигается только в случае равенства яркости объекта и фона. В случае ночного наблюдения планетного диска темный фон значительно ухудшает распознавание деталей. Еще больше страдают наблюдения темных объектов, расположенных рядом со светлыми, что имеет место, например, при изучении деталей в области пепельного света на Луне.

Заметим еще, что если темный объект расположен рядом со светлым, то он кажется еще темнее, чем в действительности, а его светлый сосед — ярче. Это составляет психофизиологический эффект, называемый *одновременным яркостным контрастом*.

5. Резкая граница между деталью и фоном. Все числовые данные, приведенные выше, относятся к случаю, когда объект и фон разделены совершенно резко. Наличие между ними зоны постепенного перехода яркости сильно повы-

шает контрастный порог. Это увеличение порога определяется угловой шириной переходной зоны, от которой зависит градиент яркости, т. е. изменение последней на единицу угла. Поэтому в отношении распылчатых, размытых пятен нельзя пользоваться значениями ϵ , приводимыми в различных таблицах и справочниках, поскольку они, как правило, соответствуют совершенно резкой границе.

Наиболее сложным будет тот случай, когда несколько факторов, из которых каждый в отдельности ведет к повышению контрастного порога, действуют совместно. Например, часто

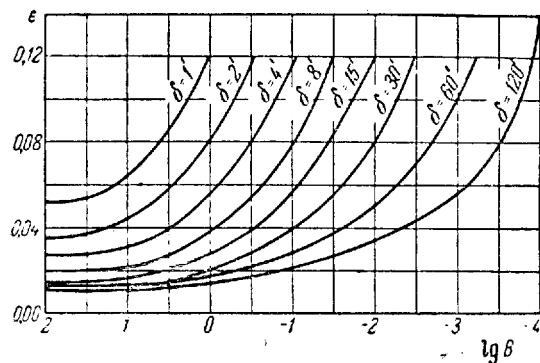


Рис. 7. Порог контрастной чувствительности глаза при одновременном изменении углового размера δ и яркости B . (По Н. Н. Сытинской.)

приходится наблюдать мелкие детали в условиях недостаточной яркости. На рис. 7 в графической форме даны некоторые материалы, относящиеся к такому сочетанию. При наблюдении деталей планетного диска мы имеем случай, особенно сложный с теоретической точки зрения, поскольку детали малы, и размыты, и находятся на пестром фоне, а наблюдение их часто ведется в условиях неустойчивой адаптации.

Для зрительного восприятия окружающего, в частности для визуального изучения планетного диска в поле зрения телескопа, большое значение имеет ощущение *цвета*. Цветоведение составляет специальную отрасль знания, вопросы которой излагаются в сочинениях по физиологической оптике и колориметрии. Здесь мы ограничимся лишь некоторыми общими сведениями, важными с точки зрения интересующих нас задач.

Ощущение цвета определяется в первую очередь распределением энергии в спектре того лучистого потока, который действует на данный участок сетчатки глаза. Два потока, имеющих одинаковый спектральный состав и одинаковую интенсивность, дают одинаковое цветовое восприятие. Однако обратное не будет

верным: одинаковым ощущениям цвета может соответствовать весьма различный спектральный состав. Многообразие цветов значительно меньше многообразия спектрального состава, а потому один и тот же цвет может быть создан бесчисленным количеством вариантов распределения энергии по спектру. Приведем в качестве примера чистый спектральный желтый цвет, соответствующий длине волны 580 мμ. Точно такой же цвет может быть получен путем смешения надлежаще подобранных количеств оранжевого и желто-зеленого, красного и голубого, красного, зеленого и синего и еще путем самых разнообразных смещений других спектральных цветов по два, по три, по четыре и т. д.

С другой стороны, лучистый поток данного спектрального состава будет вызывать в нашем глазу различные цветовые ощущения в зависимости от условий наблюдения. Прежде всего здесь влияет интенсивность, точнее, яркость рассматриваемого объекта. Если яркость снижается ниже известного уровня, то восприятие осуществляется только палочками, которые ощущений цветности не воспринимают. Зрение становится ахроматическим, и радиация любого спектрального состава воспринимается как серая. Этим объясняется, почему мы не воспринимаем окраску таких объектов, как ночное небо, туманности, Млечный Путь, зодиакальный свет, заря, создаваемая лунными лучами, и т. п. При постепенном снижении яркости ощущение цвета убывает тоже постепенно, что известно на основании повседневного опыта в сумерки: с ослаблением света цвета начинают распознаваться хуже, они как бы сереют, становятся блеклыми, их кажущаяся насыщенность плавно снижается. Такое ослабление цветовых ощущений начинается со значений яркости порядка 0,1 апостильба, а при яркостях ниже 0,001 апостильба цвет не воспринимается вовсе.

Аналогичное, хотя и меньшее влияние на восприятие цвета имеет и повышение яркости выше некоторого предела. Цвет очень ярких объектов кажется менее насыщенным и при чрезмерно больших, утомительных для глаза яркостях цвета воспринимается лучше, если смотреть через нейтрально-серое стекло, в надлежащей мере ослабляющее свет.

На восприятие цвета большое влияние имеет не только абсолютная, но и относительная яркость объекта. Цвет темного объекта, видимого одновременно с очень ярким, всегда воспринимается плохо, а при очень большом различии в яркости становится и вовсе не распознаваем. Наглядный пример этого мы можем видеть во время лунных затмений. При малых фазах погруженная в земную тень часть лунного диска всегда кажется темно-серой из-за слепящего действия светлой части. По мере увеличения фазы площадь и средняя яркость последней уменьшаются, и понемногу начинает выступать красноватая окраска тени. Но только с пол-

ным исчезновением светлого серпа, т. е. с началом полной фазы затмения, эта окраска воспринимается с полной насыщенностью.

Аналогично действует разновременное наблюдение темного объекта сразу после светлого: сначала цвет воспринимается плохо, и только после истечения некоторого времени, необходимого для достижения адаптации к рассматриваемой яркости, цвет начинает восприниматься более уверенно.

На цветовое ощущение, вызываемое лучистым потоком данного спектрального состава, большое влияние оказывает цвет других объектов, которые наблюдатель видит в поле зрения одновременно с изучаемым цветом или на которые он смотрел непосредственно перед этим. Если длительно фиксировать взор на сером объекте, расположенном на ярком цветном фоне, то у серого объекта появляется кажущаяся окраска в цвет, дополнительный к цвету поля. Так, на красном фоне серый объект кажется зеленоватым, на зеленом—красноватым, на синем—желтоватым и т. д. Это составляет явление *одновременного цветового контраста*.

В условиях обычного обозрения окружающих предметов это явление не появляется или проявляет себя очень слабо, поскольку взор быстро перебегает с предмета на предмет. Цветовой контраст проявляется достаточно резко только при продолжительной фиксации взора на данном объекте, особенно, если в поле зрения только и видно два объекта. Такие условия создаются, например, в поле зрения визуального фотометра, если одна его половина освещается солнечным светом, а другая—светом электрической лампы сравнения. В этом случае свет лампы будет казаться ярко-оранжевым или розовым, а солнечный свет синим или зеленым. Другой хорошо известный пример составляют своеобразные окраски, наблюдаемые в тесных парах двойных звезд.

При изучении планетных дисков создаются условия, способствующие возникновению цветового контраста, поскольку наблюдатель длительно вглядывается в каждую деталь. Отчасти это хорошо, поскольку весьма незначительные различия спектрального состава в результате этого становятся хорошо различимы и могут быть выявлены. Именно благодаря способности к усилению контраста глаз является самым чувствительным прибором в отношении ничтожных цветовых различий. Известно, что при надлежащем оформлении эксперимента различия цветности в 0,005 показателя цвета уже различаются зрением. С другой стороны, «трансформация» цвета, вызванная явлением одновременного контраста, конечно, является помехой в наблюдениях, поскольку она ведет к искаженному восприятию цветов. Неоднократно указывалось, например, что зеленая или голубая окраска темных областей на диске планеты Марс может быть вызвана

отчасти или даже целиком цветовым контрастом с красноватым фоном материков; во всяком случае отличить здесь реальное от кажущегося очень трудно.

Изменение цвета вызывается не только объектами, видимыми одновременно с изучаемым, но и теми цветами, на которые был обращен взор непосредственно перед наблюдением. Это составляет явление так называемого *последовательного цветового контраста*. Направление трансформации цвета тут, в общем, то же, что и при одновременном контрасте, а именно серый объект после фиксации зрения на красном цвете кажется зеленым, после зеленого цвета—красным и т. д., хотя полного тождества тут нет.

Из свойств зрения, с которыми приходится считаться при планетных исследованиях, существенное значение имеет также *иррадиация*. Так называется явление, состоящее в том, что яркий объект кажется по угловым размерам больше равного ему темного объекта. Чем выше яркость, тем сильнее кажущееся увеличение, вызванное иррадиацией. Поскольку эта расширение по абсолютному значению определяется яркостью, а не размерами объекта, оно тем заметнее, чем меньше видимый поперечник объекта. В наиболее резкой форме оно проявляется в отношении точечных источников света: этим объясняется общеизвестный факт, что звезды кажутся тем крупнее, чем они ярче. Но и для сравнительно крупных объектов иррадиация весьма значительна. Наглядный пример этому—серп Луны с пепельным светом, рассматриваемый невооруженным глазом: радиус части диска, занятой пепельным светом, кажется гораздо меньше радиуса светлого серпа.

Иррадиация вносит серьезные погрешности в измерения угловых размеров ярких объектов, в том числе и планетных дисков, так что приходится прибегать к специальным приемам для ее устранения.

§ 8. Влияние земной атмосферы на видимость деталей планетного диска

На практике предел различения тонких деталей на диске планеты чаще всего определяется не способностями зрения человека и не ограниченностью разрешающей силы телескопа, а теми эффектами земной атмосферы, которые определяют качество изображений в поле зрения телескопа.

Поток лучистой энергии от точечного космического объекта (например, от звезды) до вступления в земную атмосферу представляет собою однородный пучок параллельных лучей, фронт волны которого является плоскостью. В атмосфере происходит преломление лучей, или *рефракция*. Если бы атмосфера состояла из оптически однородных горизонтальных слоев, т. е. если бы

показатель преломления менялся в ней только с высотой над земной поверхностью, а вдоль последней был бы неизменным (как это принимается в обычной теории рефракции), то преломление, изменяя направление всех лучей пучка одинаково, не нарушало бы их параллельности. В действительности дело обстоит иначе. Вследствие завихрений при ветре и других причин, вызывающих явление *турбулентции*, в горизонтальных слоях воздуха образуются участки большей или меньшей плотности, что ведет к соответствующим колебаниям показателя преломления. Про-

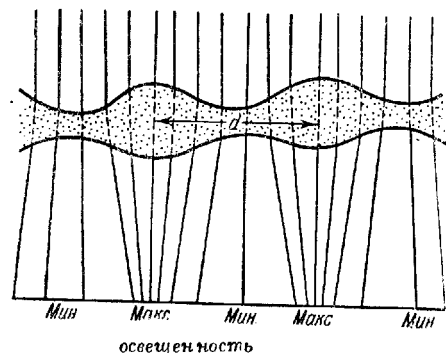


Рис. 8. Схема, поясняющая явление мерцания.

ходя через такую неоднородную прослойку воздуха и встречая на своем пути области с изменяющейся плотностью, лучи испытывают кроме общего преломления, вызываемого изменением показателя преломления с высотой, еще местные отклонения, различные для разных лучей пучка, как это схематически представлено на рис. 8. Отклонение происходит в сторону увеличения показателя преломления, т. е. к центру воздушных сгустков. В результате лучи пучка перестают быть параллельными, и фронт волны искривляется. В местах схождения лучей плотность лучистого потока, отнесенная к единице площади сечения пучка, возрастает, а в местах расхождения убывает, в результате чего световое поле становится неоднородным. А так как вся система сгущений и разрежений находится в состоянии быстрого движения и изменения, то в каждой точке пространства непрерывно меняется как направление луча, так и создаваемая им освещенность.

Описанные явления проявляют себя различно в зависимости от способа наблюдения. В общем, беспокойствие атмосферы проявляет себя в нижеследующих эффектах.

1. Мерцание звезды для невооруженного глаза. Оно является следствием поочередного прохождения через входной зрачок оптической системы глаза участков с большей и меньшей освещенностью. Поскольку видимая интенсивность точечного источника света определяется освещенностью на зрачке наблюдателя, это и дает колебания видимой яркости звезды. В силу различия показателя преломления для лучей разной длины волны лучи разных участков спектра идут в атмосфере различными путями, встречают участки различной

плотности, и поэтому мерцание для них происходит независимо, т. е. когда для одного участка спектра происходит угасание, для другого в тот же момент наблюдается вспышка. Это добавляет к яркостному мерцанию мерцание цветное, хорошо заметное при больших зенитных расстояниях и состоящее в изменении цвета звезд. Для количественного исследования явления мерцания предлагались визуальные приборы, называемые *сцинтиллометрами*; разработаны также методы фотографической и фотоэлектрической регистрации мерцания.

2. Тени на освещенном объективе и внефокальных дисках звезд. Если навести телескоп на звезду, вынуть окуляр и поместить зрачок глаза в главном фокусе объектива, то, как известно, поверхность последнего будет иметь для зрения некоторую равномерную яркость, называемую *зрачковой яркостью* или яркостью Максвелла. Эта фиктивная яркость для небольшого объектива вследствие мерцания будет непрерывно колебаться, что аналогично явлению мерцания для невооруженного глаза. Иное получается для объектива или зеркала большого диаметра. Поскольку на его площади уместается несколько участков схождения и расхождения лучей, наблюдатель увидит ряд быстро перемещающихся темных и светлых пятен. Сравнив их размеры с известным диаметром объектива, можно оценить расстояние d (рис. 8) между участками сгущений, которое обычно заключается в пределах от 5 до 50 см.

Такая же картина будет наблюдаться и на внефокальном диске, наблюдаемом визуально или фотографируемом при коротких выдержках.

Пятнистость таких изображений может стать серьезным источником затруднений при использовании внефокальных дисков звезд в качестве фотометрического стандарта, как это описано в § 41.

3. Дрожание изображений. Если наблюдать звезду при сильном увеличении телескопом, у которого диаметр отверстия объектива меньше расстояния d между сгущениями, то вследствие колебаний направления луча звезда будет быстро и закономерно перемещаться в поле зрения, что и составляет эффект дрожания. Амплитуду дрожания можно измерить при помощи того или иного визуального или фотографического метода.

4. Расплывание изображения. Если наблюдать звезду с сильным увеличением при помощи телескопа, отверстие объектива или зеркала которого больше расстояния d между сгущениями, то в объектив одновременно входят лучи со всевозможными наклонами по отношению к среднему направлению. Это дает как бы множество изображений звезды, смещенных во все стороны и перекрывающих друг друга, в результате чего звезда

расплывается в туманный переливающийся диск, размеры которого соответствуют амплитуде дрожания. Например, на 40-дюймовом рефлекторе Симеизской обсерватории в ночи с особенно беспокойным воздухом звезды расплывались настолько, что видом своим походили на планетарные туманности. Но если перед большим объективом поместить диафрагму с малым отверстием, то изображение звезды становится маленьким и резким, но скачущим, т. е. мы будем иметь перед собой 3-й случай. Для

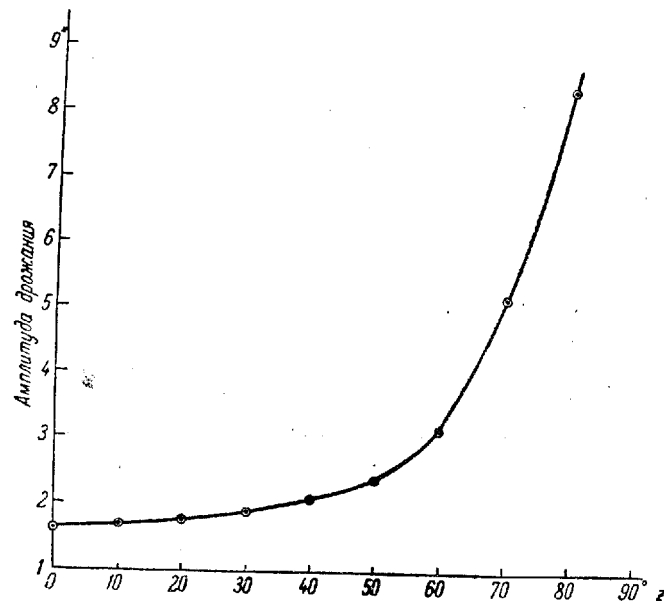


Рис. 9. Зависимость амплитуды атмосферного дрожания от зенитного расстояния z .

иллюстрации этих явлений проделывают еще такой опыт. Перед большим объективом помещают крышку с двумя небольшими отверстиями на краях. В поле зрения появляются два изображения звезды, быстро скачущих в поле зрения независимо одно от другого. Равным образом можно взять крышку с тремя отверстиями и наблюдать независимое движение трех изображений.

Все описанные явления быстро возрастают с зенитным расстоянием звезды z , что является естественным следствием увеличения пересекаемой лучом воздушной массы по закону секанса зенитного расстояния и возрастания угла рефракции пропорционально тангенсу зенитного расстояния. Для примера на рис. 9 дана кривая изменения амплитуды дрожания в зависимости от z .

Итак, благодаря перемещению оптических неоднородностей воздуха луч света от звезды непрерывно колеблется относительно направления, определяемого нормальной общей рефракцией. Мгновенные его положения заключены внутри некоторого конуса, вершина которого совпадает с центром небесной сферы, осью является среднее направление луча, а образующие представляют собою положения луча в крайних направлениях. Этот конус называют иногда *конусом турбулентии*. В зависимости от обстоятельств направляющая конуса может быть окружностью (что означает равенство амплитуды отклонений для всех позиционных углов) или же эллипсоподобной кривой, причем в последнем случае большая ось эллипса совпадает с направлением вертикала (амплитуда отклонений для вертикального направления больше, чем для горизонтального). При наблюдении звезды телескопом с очень малым отверстием объектива наблюдатель фиксирует положение светила, определяемое мгновенным направлением луча и, следовательно, видит быстрое перемещение («дрожание») звезды в пределах участка небесной сферы, ограниченного линией пересечения сферы с поверхностью конуса турбулентии. Резкость дифракционной картины при этом может и не нарушаться, в связи с чем теоретически остается прежней и разрешающая сила, но условия наблюдения сильно страдают из-за непрерывного движения и искривления наблюдаемой детали. При наблюдении с объективом очень большого отверстия площадь последнего в любой момент времени захватывает лучи всех возможных направлений, и наблюдатель видит всю площадь сечения сферы конусом турбулентии заполненной светом. Изображение звезды расплывается в пятно, угловой радиус которого равен амплитуде дрожания. Таким образом, маленький дифракционный диск звезды заменяется большим бурлящим пятном, радиус которого при очень беспокойном воздухе или низком положении светила может превосходить $10''$. Очевидно, что пропорционально увеличению размеров пятна снижается и разрешающая сила. Получается парадоксальный на первый взгляд вывод: при беспокойном воздухе большой объектив обладает меньшей разрешающей силой, чем малый. Практика подтверждает этот вывод, что находит свое выражение в содержащихся во многих инструкциях рекомендациях диафрагмировать большие объективы при беспокойных изображениях.

Все изложенное представляет собою лишь упрощенную схему действительных явлений, которые могут происходить весьма сложно. В частности, нередко наблюдается сочетание колебаний направления луча, происходящих с разной амплитудой и различным периодом. Наряду с обычным быстрым дрожанием, период которого составляет доли секунды, происходит медленное смещение изображения с периодом в несколько секунд. В этом случае

наблюдатель видит, как неправильно скачущее изображение звезды на некоторое время приподнимается и, попрыгав на несколько большей высоте, опять опускается к прежнему положению. Амплитуда медленных колебаний может быть как больше, так и меньше, чем у быстрого дрожания.

Причина таких явлений заключается в сложности строения самой атмосферы, в различных слоях которой имеет место весьма различная турбулентция. Ряд опытов и теоретических соображений указывают на существование в воздухе определенного слоя, лежащего на высоте от 3 до 5 км, в котором движутся неоднородности, определяющие главное дрожание короткого периода. Другой зоной интенсивной турбулентции часто оказывается приземный слой воздуха, особенно дном, при интенсивном нагревании земной поверхности солнечными лучами. Далее, возможны чисто местные очаги волнения воздуха, например завихрения, получающиеся при встрече ветра с дверцами люка купола башни телескопа. В самой трубе телескопа также происходит движение воздуха, особенно при неравномерном нагревании. Указывалось, что при прочих равных условиях изображения в рефракторах бывают спокойнее, чем в рефлекторах, что приписывают более интенсивной циркуляции воздуха в открытой трубе рефлектора.

Крайняя важность спокойствия изображений для планетных, а также и многих других наблюдений заставляет выбирать для обсерваторий местности с наиболее благоприятными атмосферными условиями. В связи с этим большое развитие получили работы по изучению *астроклимата* различных районов. В понятие «астроклимат» включают совокупность всех геофизических элементов, определяющих свойства данного пункта как места, предназначенного для астрономических наблюдений. Помимо спокойствия изображений, в него включаются данные о таких факторах, как средний балл облачности и вероятность ясного или пасмурного состояния неба, прозрачность атмосферы (общая и по отдельным спектральным участкам), степень постоянства или изменчивости прозрачности во времени, яркость фона ночного неба, яркость дневного неба и яркость атмосферного ореола, наблюдаемого ночью вокруг диска яркого светила. Последние два фактора имеют существенное значение и для планетоведения.

Свет дневного неба накладывается на фон диска планеты и этим значительно снижает контрасты яркости между деталями и фоном. Пусть истинные яркости объекта и фона равны B_2 и B_1 . Действие атмосферы, с одной стороны, благодаря эффекту экстинкции (на чем мы остановимся ниже) снижает их до значений TB_2 и TB_1 (где T —коэффициент пропускания атмосферной толщи), а с другой—прибавляет к каждой из них яркость B_n света неба. В результате этого яркости B'_2 и B'_1 , наблюдаемые сквозь атмо-

сферу, будут:

$$B'_1 = TB_1 + B_n; \quad B'_2 = TB_2 + B_n, \quad (16)$$

а составляемый ими контраст K' выражается равенством [см. формулу (15)]:

$$K' = \frac{B'_1 - B'_2}{B'_1} = \frac{B_1 - B_2}{B_1 + \frac{B_n}{T}} = \frac{K}{1 + \frac{B_n}{TB_1}} < K, \quad (17)$$

где K —истинное (не измененное атмосферой) значение контраста.

Коэффициент пропускания T выражается известной формулой Бутера:

$$T = p^M, \quad (18)$$

где p —коэффициент прозрачности атмосферы, а M —значение оптической массы воздуха (см. § 51) для зенитного расстояния z светила. Для яркости неба B_n в качестве первого приближения можно принять формулу

$$B_n = B_0(1 - p^M), \quad (19)$$

где B_0 —некоторый коэффициент, определяемый (в числе прочих факторов) угловым расстоянием данной точки небесного свода от центра солнечного диска. Приведенные выше равенства позволяют выразить значения контраста K' для детали на планетном диске, наблюдаемом в дневных условиях, такой формулой:

$$K' = \frac{K}{1 + \frac{B_0}{B_1} \frac{1 - p^M}{p^M}}. \quad (20)$$

Отсюда видно, что K' убывает с увеличением зенитного расстояния объекта и с уменьшением коэффициента прозрачности p , чем и иллюстрируется значение последнего в тех случаях, когда наблюдают планеты в дневное время. Зависимости, выражаемые формулой (20), хорошо иллюстрируются примером лунного диска, наблюдаемого невооруженным глазом. При хорошей прозрачности воздуха, сопровождаемой темным синим небом, и большой высоте Луны над горизонтом моря на лунном диске днем различаются вполне резко. Понижение прозрачности, проявляющее себя в увеличении яркости и понижении насыщенности синего цвета небесного свода, ведет к значительному ухудшению видимости морей. По мере уменьшения высоты Луны моря исчезают полностью, а ближе к горизонту становится неразличим и самый лунный диск.

Действие атмосферного ореола аналогично влиянию света дневного неба. Разница в том, что яркость последнего образуется за счет рассеяния в атмосфере лучей Солнца, в то время как ореол

возникает за счет рассеяния лучей самой планеты и потому наблюдается ночью. Яркость ореола сравнительно быстро снижается с удалением от центра диска светила, и потому в пределах последнего она в отличие от яркости дневного неба не является одинаковой. Ореол вызывается интенсивным рассеянием лучей в направлениях, близких к направлению светового потока от светила. Поэтому он и проявляет себя в резком повышении яркости в зоне небесного свода, непосредственно примыкающей к диску Луны или планеты. Будучи обусловлен рассеянием только на крупных частицах воздушного планктона (пыль, дым, водяные капли), он сильно меняет свою интенсивность в зависимости от состояния атмосферы. Наиболее интенсивные ореолы постоянно наблюдаются в летнюю часть года в зоне степей и пустынь (Средняя Азия, Закавказье, юго-восток Европейской части СССР), что объясняется сильной запыленностью воздуха. Напротив, в высокогорных районах, а также на равнинах в зимнее время ореол может полностью отсутствовать.

Заметим, что хотя ореол является результатом загрязнения атмосферы посторонними частицами, прямой зависимости между его интенсивностью и прозрачностью, характеризуемой коэффициентом p , нет. Бывают случаи, когда при очень интенсивном ореоле коэффициент прозрачности p достаточно высок и, напротив, когда при полном отсутствии ореола он сравнительно низок.

При изучении астроклимата некоторого пункта такие факторы, как коэффициент прозрачности p , распределение яркости по небесному своду и яркость ореола, определяются при помощи фотометрических измерений, на технике которых мы здесь не останавливаемся, отсылая читателя к соответствующим работам по астротометрии. Что касается до качества изображений, то для его оценки предложен ряд специальных приемов, важнейшие из которых сводятся к следующему.

А. Глазомерная оценка качества изображений по 10-балльной шкале, предложенной Пиккерингом и основанной на степени видимости различных деталей дифракционной картины изображений звезд. Баллы этой шкалы имеют такие значения:

1. Изображение звезды все время значительно (примерно вдвое) больше третьего дифракционного кольца и имеет вид бурлящего пятна, усеянного вспыхивающими блестками.

2. Изображение по временам больше диаметра третьего кольца.

3. Изображение примерно такого же диаметра, как третье кольцо, и к центру ярче.

4. Временами появляется дифракционный диск, иногда также отдельные куски колец.

5. Диск виден постоянно, дуги колец—часто.

6. Диск и дуги видны постоянно.

7. Диск временами резко отчетлив. Видны длинные движущиеся дуги, по временам—целые кольца.

8. Диск все время резко отчетлив; вокруг него видны движущиеся длинные дуги и кольца.

9. Диск резко отчетлив, внутреннее кольцо неподвижно и видно непрерывно, внешние кольца движутся.

10. Вся дифракционная картина резка и неподвижна.

Оценки по такой шкале благодаря их простоте и доступности находят среди наблюдателей самое широкое применение. Для того чтобы читатель составил о ней более наглядное представление, мы приводим на рис. 10 в несколько схематизированном виде соответствующие баллам облики изображений. Следует иметь в виду, что наблюдения обязательно должны вестись телескопом с достаточно большим отверстием объектива, поскольку в маленький телескоп резкая дифракционная картина может наблюдаться и при неспокойном воздухе. В качестве нормального инструмента для наблюдений по методу Пиккеринга указывается рефрактор с объективом в 125—150 мм при увеличении в 200—300 раз. Инструменты с большим отверстием не рекомендуются, с меньшим—безусловно не допускаются.

Разумеется, балл изображений зависит от зенитного расстояния звезды. В качестве примера на рис. 11 представлена кривая изменения балла с зенитным расстоянием.

Б. Оценка амплитуды дрожания звезды. Употребляется сильный окуляр с помещенной в фокусе шкалкой, в крайнем случае—с двумя нитями, натянутыми на расстоянии около 5" одна от другой. Сравнивая перемещения звезды с известным расстоянием между штрихами шкалы, можно на глаз оценить величину наибольших смещений прямо в секундах.

В. Фотографирование следа яркой звезды на длиннофокусном астрографе при остановленном часовом механизме. При отсутствии дрожания след получается в виде ровного отрезка прямой линии, при его наличии получается зубчатая линия. Измеряя на снимке величину зубцов, легко получить амплитуду дрожания. Метод имеет то преимущество, что он позволяет выделять колебания различных периодов.



Рис. 10. Шкала для оценки качества изображений, предложенная Пиккерингом.

Как уже было указано, дрожание возрастает с зенитным расстоянием, причем если за аргумент взять $\sec z$, то точки на графике ложатся примерно по прямой линии. Между дрожанием и качеством дифракционной картины, конечно, существует известное соотношение, которое сводится примерно к тому, что отношение амплитуды дрожания к радиусу r дифракционного диска звезды при баллах 1—3 превышает 1,5—2, при баллах 4—5 оно приближается к 1, при баллах 7—8 составляет около $1/2$, а при балле 9 оно равно $1/4$.

Исследование и оценка наблюдений качества изображений наталкиваются на то существенное затруднение, что результат

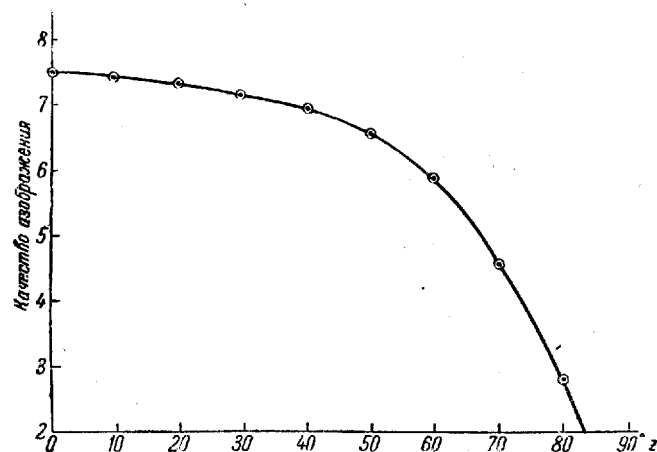


Рис. 11. Зависимость качества изображения от зенитного расстояния z .

наблюдения сильно зависят от диаметра объектива: чем последний меньше, тем лучше дифракционная картина и тем сильнее дрожание. Чаще всего приходится встречаться с переоценкой и завышением качества изображений, проистекающими из оценок по шкале Пиккеринга, выполняемых, вопреки инструкциям, с малыми телескопами.

Говоря о постановке планетных наблюдений, необходимо отметить, что качество изображений случайным образом меняется ото дня ко дню. Синоптические условия, определяющие спокойные или беспокойные изображения, в настоящее время еще не изучены. Но во всяком случае бесспорно, что в каждом пункте бывают ночи как с хорошими, так и с плохими изображениями, так что в какое-то число ночей телескопические наблюдения деталей на планетных дисках могут вестись в любом месте. Из этого ясно, что предпринимавшиеся иногда быстрые объезды множества пунктов, при которых наблюдатель вел определения каче-

ства изображений на протяжении одной-двух ночей, с точки зрения пригодности места для постройки обсерваторий не имеют никакой цены. Поскольку качество изображений является метеорологическим элементом, оно должно изучаться на основе методов, принятых в климатологии, т. е. прежде всего на основе длительных, регулярных и однородно выполненных рядов наблюдений. Результаты таких наблюдений должны представляться не только в форме средних значений, но и в виде материалов, статистически характеризующих распределение ночей по различным показателям спокойствия.

Несмотря на большое количество обследований, проведенных, в частности, в СССР, каких-либо общих правил для выбора мест со спокойными изображениями указать нельзя. Бывает, что сравнительно близко расположенные пункты по характеру изображений не обнаруживают никакого сходства. Характерный пример—Крым, где на южном берегу (Симеизская обсерватория) часто наблюдаются плохие и даже очень плохие изображения, в то время как у северных склонов Яйлы (Симферополь, Топлы) и в горных районах (Партизанское, Ай-Петри) преобладают хорошие изображения. Вообще же значительная высота пункта над уровнем моря желательное спокойствие изображений отнюдь не обеспечивает.

Резюмируя сказанное выше, мы можем дать нижеследующий перечень требований, предъявляемых с точки зрения планетных наблюдений к месту расположения обсерватории:

- 1) низкое значение географической широты, поскольку все атмосферные помехи снижаются с высотой планеты над горизонтом;
- 2) возможно большее число ясных ночей и равномерное распределение последних по сезонам;
- 3) максимальный процент дней и ночей с высоким качеством изображений на протяжении всего года;
- 4) высокая прозрачность воздуха, малая яркость дневного неба, малое число дней с атмосферным ореолом и незначительная интенсивность последнего.

§ 9. Техника визуальных наблюдений планет

Успех визуального наблюдения деталей поверхности планеты или спутника в основном определяется тремя условиями: достаточной мощностью и хорошими качествами телескопа, спокойствием земной атмосферы и опытом наблюдателя. Значение последнего условия понятно, поскольку всякое субъективное наблюдение требует умения и сноровки, на что всегда указывают астрономы, много лет занимавшиеся телескопическим изучением планет. С другой стороны, длительная работа одним и тем же мето-

дом бывает связана с известными традициями, а последние легко приводят сначала к консерватизму, а потом и к предвзятости. Наглядный пример этому—положение вопроса с каналами на Марсе: в то время как одни наблюдатели их видят постоянно, наносят на карты сотнями и даже считают возможным изучать детали их строения и изменений со временем, другие астрономы, наблюдающие примерно в тех же условиях и с не менее сильными инструментами, совершенно их не замечают и на этом основании полностью отрицают самый факт их существования. По этому поводу долго шла дискуссия, причем тех, кто видит каналы, упрекали в предвзятости, а тех, кто не видит,—в недостатке опыта.

Атмосферное волнение не зависит от наблюдателя, однако это вовсе не означает, что к нему можно относиться пассивно. Напротив, опытный наблюдатель, активно приспособляясь к существующим атмосферным условиям, может и в мало благоприятной обстановке сделать очень много. Во-первых, длительная практика позволяет детально изучить особенности астроклимата места наблюдения и к ним привыкнуть. Конечно, планеты выгоднее всего наблюдать при наибольшей высоте над горизонтом, т. е. около времени их верхней кульминации, но всегда может оказаться, что наряду с этим общим правилом необходимо учитывать и местные особенности, в силу которых изображения в вечерние часы ночи бывают лучше, чем в предрассветные, или наоборот. Далее, в каждую ясную ночь необходимо вести наблюдения длительно, непрерывно глядя в окуляр и терпеливо выжидая моменты временного успокоения атмосферы. Иногда приходится следить за светилом часами, чтобы выловить несколько минут действительно прекрасных изображений.

Далее, необходимо уметь подобрать такую технику работы с телескопом, которая в наличной обстановке дает наилучший результат. Для этого прежде всего надо иметь достаточный набор окуляров, позволяющий выбрать то увеличение, которое при данной степени дрожания наиболее эффективно для выявления мелких деталей. Если при очень спокойных изображениях наиболее эффективны увеличения, близкие к максимальному, то при сильном дрожании часто бывает выгоднее наблюдать при среднем увеличении. Далее, необходимо иметь набор диафрагм, устанавливаемых перед входным отверстием телескопа. На большом инструменте наблюдение с полным отверстием оправдывает себя только при наилучших изображениях; при сильном дрожании, как это было объяснено в предыдущем параграфе, наблюдение при большом отверстии ведет к размыванию изображений и снижению разрешающей силы, а потому бывает выгодно задиафрагмировать большой объектив до $\frac{1}{2}$, иногда до $\frac{1}{4}$ или даже до $\frac{1}{10}$ его поперечника. Подбирая наилучшую комбинацию окуляра

и диафрагмы, удастся различать много деталей даже при посредственных изображениях.

Возможности визуальных наблюдений можно расширить, применяя цветные светофильтры. Для объектов, характерных значительной окрашенностью деталей, как, например, для Марса и Юпитера, наблюдение через надлежаще подобранный светофильтр позволяет увеличить контраст яркости при различной окраске детали и фона и этим сделать деталь заметнее, что составляет так называемый *цветоделительный эффект*. Например, при наблюдении диска Марса через красный светофильтр красноватые материи выигрывают в яркости по сравнению с зеленоватыми морями и оазисами, а потому последние выделяются более резко. Полезно иметь набор светофильтров, выделяющих из видимого спектра определенные участки, например красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий. Желательно, чтобы светофильтр резко отрезал выделяемый им участок и совсем не пропускал лучей соседних участков, в чем легко удостовериться, просматривая сквозь имеющиеся фильтры солнечный спектр при помощи карманного спектро스코па. К сожалению, это условие легко осуществить лишь в отношении красных и желтых светофильтров, труднее в отношении зеленых и сине-зеленых и совсем невозможно в отношении синих и фиолетовых, поскольку последние всегда пропускают много красных лучей.

Цветоделительный эффект, достигаемый применением светофильтра, как правило, тем сильнее, чем уже область пропускания фильтра. Но, с другой стороны, сужение области пропускания сопровождается уменьшением яркости, а последнее ведет к повышению порога контрастной чувствительности зрения и снижению остроты. Поэтому при наблюдении глазом всегда приходится пользоваться светофильтрами с довольно широкой зоной пропускания, что и ограничивает ценность метода светофильтров при визуальном наблюдении. Особенно большие затруднения возникают при наблюдениях у краев видимого спектра, например в фиолетовых и крайних красных лучах, где спектральная чувствительность глаза очень низка, и потому яркость получается слишком малой даже при широких участках спектра. Следует также иметь в виду, что при пользовании светофильтром пропадает одно из ценных качеств зрительного восприятия, а именно различие в цвете, поскольку все объекты получают одинаковую окраску, определяемую областью пропускания фильтра.

От последнего недостатка свободен особый тип светофильтров, называемых *цветоконтрастными*. Назначение таких светофильтров—усиливать различие цвета определенных групп деталей. Типичным представителем этого рода фильтров будет такой, сквозь который нейтральные объекты сохраняют свою серо-белую окраску, желтоватые становятся краснее, а голубоватые—

сине. Кривая спектрального пропускания такого фильтра должна давать два максимума: в синих и красных лучах, и глубокий минимум—в желто-зеленых. Целесообразность применения таких светофильтров была показана Г. А. Тиховым, над ними работал также В. А. Фаас, а общая теория усиления цветового контраста была разработана Г. Н. Раутианом. Несомненно, что применение цветокоонтрастного светофильтра к выявлению тонких и едва заметных цветовых различий, какими характерен, например, диск Луны, может привести к весьма ценным выводам.

Яркость наблюдаемого диска планеты имеет существенное влияние на распознавание деталей. Одним из затруднений при изучении подробностей на Уране и Нептуне, помимо малых угловых размеров дисков этих планет, является и недостаточная яркость, обусловленная удаленностью от Солнца. Поэтому при таких наблюдениях важно обеспечить адаптацию зрения к надлежащему уровню яркости. С другой стороны, Луна и Венера, наблюдаемые в условиях ночной темноты и адаптации зрения к слабому свету, кажутся чрезмерно яркими и производят на глаз наблюдателя слепящее действие. Поэтому при наблюдении этих светил рекомендуется применять слабый нейтрально-серый светофильтр перед окуляром. Другая альтернатива—создавать в башне сильное искусственное освещение, чтобы зрение сохраняло дневной уровень адаптации, что принципиально даже выгоднее.

При наблюдениях днем, которые особенно часто применяются в отношении Меркурия и Венеры, приходится бороться с вуалирующим эффектом дневного неба, ведущим к снижению и без того малых контрастов на дисках этих светил. Помимо общих приемов, состоящих в выборе дней с высокой прозрачностью атмосферы и часов суток, когда высота светила над горизонтом достигает максимума, невыгодную сторону дневных наблюдений можно несколько ослабить, наблюдая сквозь красный светофильтр, который снижает яркость голубой вуали неба в большей степени, чем яркость белого диска планеты. Для той же цели предлагали использовать поляризационную призму (анализатор) или пластинку из поляроида, которые при надлежащей ориентировке ослабляют сильно поляризованный свет ясного неба много сильнее, чем слабо или вовсе не поляризованные лучи светила.

Поскольку рассеяние света происходит не только в воздухе, но и в оптике, трубе и других частях телескопа, очень важно, чтобы объектив последнего получал минимум побочного освещения. Это достигается неполным раскрытием люка купола (если последний широк) и применением достаточно длинной объективной трубы-насадки, вычерченной внутри и снабженной рядом внутренних диафрагм, перехватывающих лучи, косо отражаемые внутренними стенками. Совершенно обязательно, чтобы прямые лучи Солнца не попадали не только на объектив, но и на внутрен-

ние стенки защитной трубы. При наблюдении планет в соединениях с Солнцем осуществлять это условие бывает далеко не просто. Приходится устраивать специальные щитки, козырьки и ширмы, укрепляемые как на объективном конце трубы, так и на куполе башни.

Не следует думать, что фон дневного неба всегда является только помехой. Вызываемое им снижение контраста в известной мере компенсируется снижением порога контрастной чувствительности зрения, обусловленным устойчивой адаптацией в дневных условиях и отсутствием темного фона вокруг диска планеты. Последним объясняется, например, тот известный факт, что потемнение к краю на дисках Венеры и Юпитера ночью замечается с большим трудом, в то время как днем или в сумерки его видно очень ясно.

Фиксация замеченного в телескоп обычно оформляется в виде рисунка, набрасываемого от руки тут же у окуляра. В многочисленных инструкциях к такого рода работе, составленных на основании длительного опыта, рекомендуется заранее заготовить контур диска удобного для рисования размера, который будет иметь вид круга (для планеты, не имеющей сжатия) или эллипса (для Юпитера, Сатурна). Положение терминатора на контуре наносится или заранее по данным эфемериды (если изучение явления фаз не является задачей наблюдений) или же намечается по видимой в поле зрения телескопа картине. Затем наносят контуры основных, легко видимых образований, тщательно сверяя их расположение по отношению к краям диска с оригиналом. После этого, старательно вглядываясь и выжидая моменты успокоения изображения, дополняют рисунок мелкими деталями.

Рекомендуется делать по несколько повторных зарисовок подряд. Хотя они и не будут независимы друг от друга, поскольку при каждой следующей зарисовке будет сохраняться воспоминание о предыдущих, все же их сравнение и сопоставление позволяют делать некоторые суждения о точности нанесения деталей. Другой, более надежный способ оценки точности состоит в зарисовывании искусственных моделей планет, например фотографий и диапозитивов или специально изготовленных схематических изображений, расположенных и освещенных так, чтобы по возможности воспроизводились условия, имеющие место при реальном наблюдении планет в телескоп.

Сравнение серий рисунков, выполненных различными наблюдателями, обнаруживает огромное влияние личных особенностей каждого рисовальщика на получаемое изображение. Влияние манеры и стиля в нанесении виденной картины иногда бывает столь значительным, что в одновременно выполненных разными лицами зарисовках одной и той же планеты бывает трудно признать один и тот же оригинал. В особенности это относится к

передаче относительной яркости различных частей диска, однако и контуры образований нередко тоже изображаются весьма различно (рис. 12). Чаще всего встречается тенденция изображать

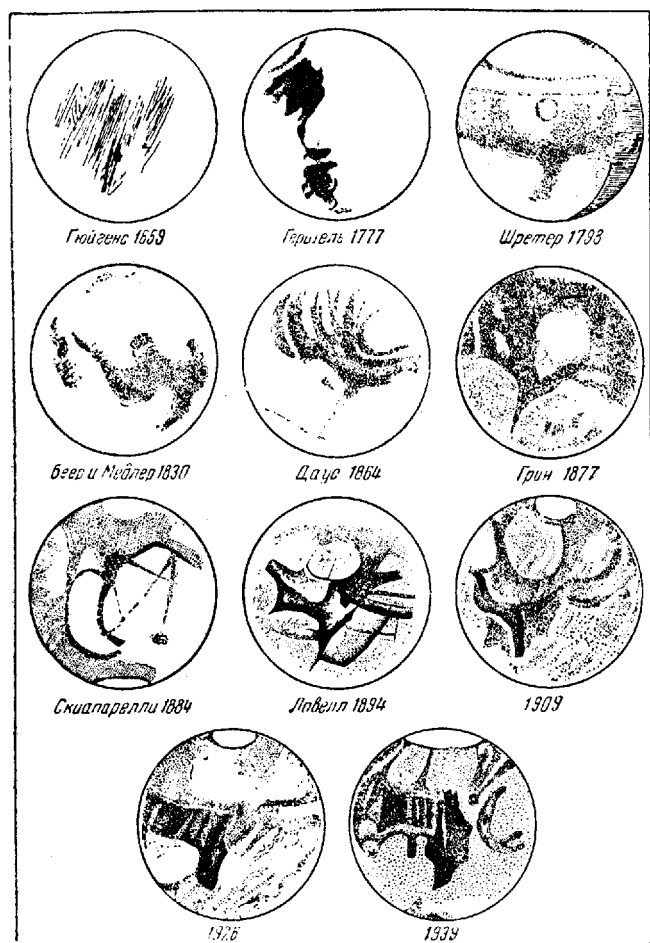


Рис. 12. Проявление субъективности при зарисовках одной и той же области на поверхности Марса.

извилистые и неправильные границы в виде ровных линий, пятно сложных очертаний зарисовывается как круглое, кривые прерывчатые полосы изображаются в виде сплошных прямых линий (рис. 13, 14). Последняя тенденция была подвергнута длительному и разностороннему изучению в связи с проблемой «каналов» Марса.

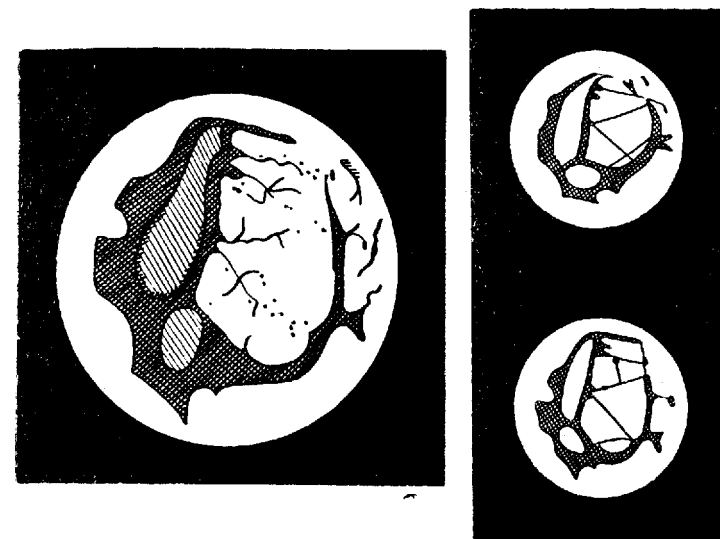


Рис. 14. Вверху — оригинал, предложенный для рисования группе наблюдателей-школьников; внизу — рисунок оригинала, сделанный двумя лицами.



Рис. 13. Рисунок диска полной Луны, выполненный при наблюдении невооруженным глазом. Ясно заметна тенденция к упрощению и выпрямлению контуров (ср. рис. 50).

Для многих объектов зарисовки могут стать много богаче и содержательнее, если наблюдатель выполняет их в красках, с достаточной точностью и беспристрастностью передавая цветовые оттенки. Прекрасные цветные рисунки лунных затмений, диска Марса, облачных систем Юпитера и других небесных светил, опубликованные в наших журналах, могут служить иллюстрацией этому.

Серии рисунков помещаются в специальные альбомы или, что лучше, наклеиваются на карточки и сохраняются в форме карточки. Полная их публикация редко оказывается возможной, да и едва ли она целесообразна, а потому в печати воспроизводятся только некоторые наиболее удачные и типичные рисунки или сводные изображения, обобщающие определенные группы наблюдений. Желательно, чтобы каждый рисунок сопровождался детальным словесным описанием изображенных на нем деталей, а также условий наблюдения.

§ 10. Теория передачи деталей на фотографическом снимке

Приступая к изложению фотографического метода наблюдения деталей планетного диска, мы прежде всего должны вспомнить общие свойства фотографических материалов, определяющие качество фотографического изображения, и способность последнего к передаче деталей, малых либо по угловым размерам, либо по составляемому с фоном контрасту яркости.

Участок фотографической эмульсии, подвергавшийся действию света, после проявления оказывается почерневшим. Степень почернения количественно выражают *оптической плотностью* D , под которой понимают десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания τ данного участка фотографической пластинки или пленки для потока световых лучей, направленного к плоскости пластинки нормально:

$$D = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau. \quad (21)$$

Величина D , получающаяся на данном участке фотографического негатива, зависит от ряда факторов, из которых важнейшими являются: освещенность E эмульсионного слоя в момент экспозиции, продолжительность экспозиции t , чувствительность и вообще свойства использованной эмульсии, способ и продолжительность проявления. Для различных точек данного негатива все факторы, кроме первого, обычно можно считать одинаковыми (по крайней мере, в первом приближении). Поэтому картина распределения плотности по негативу соответствует распределению освещенности во время экспозиции. С другой стороны, освещенность E , получаемая в некоторой точке пла-

стинки, установленной в фокальной плоскости астрографа, пропорциональна яркости B элемента объекта, изображение которого проектируется в эту точку:

$$E = \tau_a \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{F^2} B, \quad (22)$$

где τ_a —коэффициент пропускания оптики астрографа, а D/F —относительное отверстие. Коэффициент τ_a меняется с расстоянием от оптического центра пластинки, но для фотографических наблюдений планет это несущественно, поскольку угловые размеры планетных дисков очень малы, и мы всегда имеем возможность фотографировать планету точно на оптической оси. В этих условиях коэффициент пропорциональности между E и B будет постоянным, и мы можем в перечне факторов, определяющих плотность D , заменить освещенность E яркостью фотографируемого объекта B . Из этого следует, что распределение плотности на негативном изображении снятого объекта, например планетного диска, определяется распределением яркости по поверхности последнего.

Зависимость между плотностью D и освещенностью E или, в силу сказанного выше, яркостью B принято представлять в графической форме—в виде так называемой *характеристической кривой*. В этом случае по оси абсцисс откладывается логарифм яркости $\lg B$, а по оси ординат—соответствующая плотность негатива D . Зависимость между D и B на таком графике представляется характерной S-образной кривой, представленной на рис. 15. Эта кривая является основой фотографической фотометрии планетных дисков, о чем подробно будет рассказано в § 40. Здесь мы используем характеристическую кривую для изложения вопроса о фотографической передаче яркостей объекта, причем, ограничиваясь изучением проблемы в первом приближении, мы будем следовать классической схеме Хертера и Дриффильда.

Характеристическую кривую принято разделять на ряд участков, имеющих для воспроизведения деталей фотографируемого объекта неодинаковую ценность и носящих специальные наименования. На участке KL (рис. 15) кривая идет параллельно оси абсцисс. Здесь действие света слишком незначительно и потому не производит никакого почернения, в результате чего плотность D_v получается такая же, как и на участках эмульсии, совсем не подвергавшихся действию света (например, на краях пластинки, закрытых во время экспозиции рамкой кассеты). Почернение, получающееся после проявления на таких участках негатива, называется *вуалью*, почему и плотность D_v называют *плотностью вуали*. Начиная от точки L , действие света становится заметным, и повышение яркости B сопровождается сначала

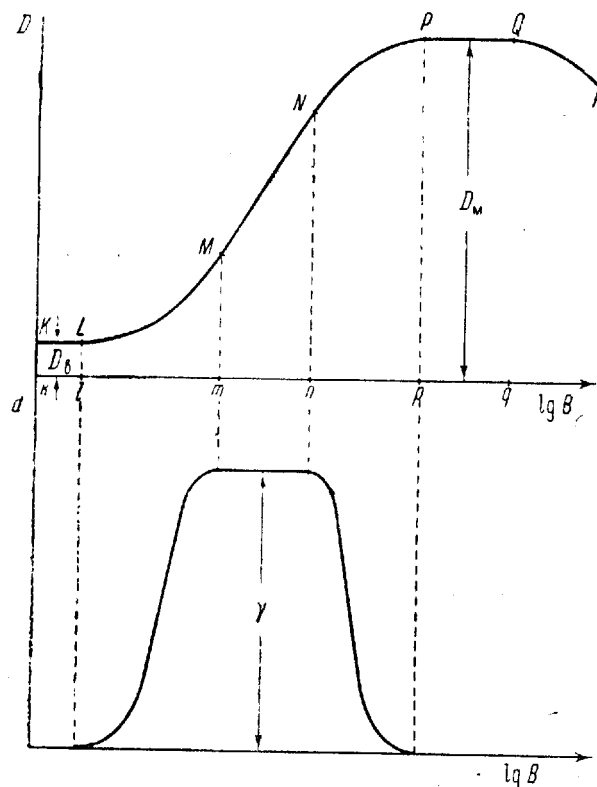


Рис. 15. Характеристическая кривая негатива.

области некоторой разности яркостей B_2 и B_1 соответствует на проявленном негативе наибольшая разность плотностей D_2 и D_1 :

$$D_2 - D_1 = \gamma (\lg B_2 - \lg B_1). \quad (23)$$

Угловой коэффициент γ прямолинейного участка характеристической кривой является одной из важнейших характеристик негатива. Он называется *коэффициентом контрастности*, а в практической фотографии—часто просто словом «гамма». На участке NP рост D с ростом $\lg B$ замедляется и в точке P прекращается совсем. Это будет *участок передержки*, где кривая обращена выпуклостью к оси ординат. Между точками P и Q кривая идет параллельно оси абсцисс, из чего следует, что дальнейшее

повышение яркости уже не сопровождается увеличением плотности, которая в точке P достигает своего предельного значения D_m . Это—область максимальной плотности, где никакого изображения не получается. Наконец, при очень высоких яркостях, которым соответствует участок QR , начинается уменьшение плотности с яркостью; это явление называется *соларизацией*.

В нижней половине рис. 15 представлен график изменения производной характеристической кривой, т. е. величины

$$s_0 = \frac{dD}{d \lg B},$$

называемой в фотографии *градиентом*. В зоне вуали, очевидно, $g=0$, в области недодержек g растет и в точке M достигает максимального значения $g=\gamma$, на котором и остается на протяжении всего прямолинейного участка. В области передержки g уменьшается и обращается в нуль в точке P .

Вид характеристической кривой зависит от способа и продолжительности проявления. По мере возрастания отрезка времени T , в течение которого проявитель действует на эмульсию, плотность в любой точке негатива растет соответственно формуле

$$D = D_{\infty} (1 - e^{-kT}), \quad (24)$$

где k —некоторый параметр, который зависит от состава, концентрации и температуры проявляющего раствора. В соответствии с этим характеристическая кривая изменяется в порядке последовательности, представленной на рис. 16, причем коэффициент контрастности γ растет с T согласно формуле

$$\gamma = \gamma_{\infty} (1 - e^{-kT}). \quad (25)$$

Таким образом, плотность всех участков негатива и коэффициент γ с увеличением времени проявления растут, асимптотически приближаясь к некоторым конечным значениям. Последние практически достигаются уже после сравнительно небольшого срока проявления, например для обычных быстродействующих проявителей уже через 8—10 минут, так что дальнейшее проявление уже не влечет за собой существенных изменений. Следует иметь в виду, что равенства (24) и (25) представляют собою лишь приближенные эмпирические выражения, пользоваться которыми можно только в пределах ограниченного интервала значений T .

Характеристическая кривая является тем средством, при помощи которого фотограф контролирует процесс получения изображения на негативе, добиваясь такого качества последнего, которое соответствует поставленным требованиям. В случае фотографирования планет эти требования сводятся к наиболее

полной передаче деталей, небольших по угловым размерам, с одной стороны, и малоконтрастных—с другой. Детали последнего типа требуют для своего воспроизведения наибольшего значения градиента g . Отсюда вытекает простое условие: съемку планеты надо вести так, чтобы весь интервал яркостей, имеющих на диске, попадал в зону mn , которой соответствует прямолинейный участок характеристической кривой MN . Технические средства, позволяющие удовлетворить этому условию, рассматриваются в разделе научной фотографии, называемом *экспонетрией*.

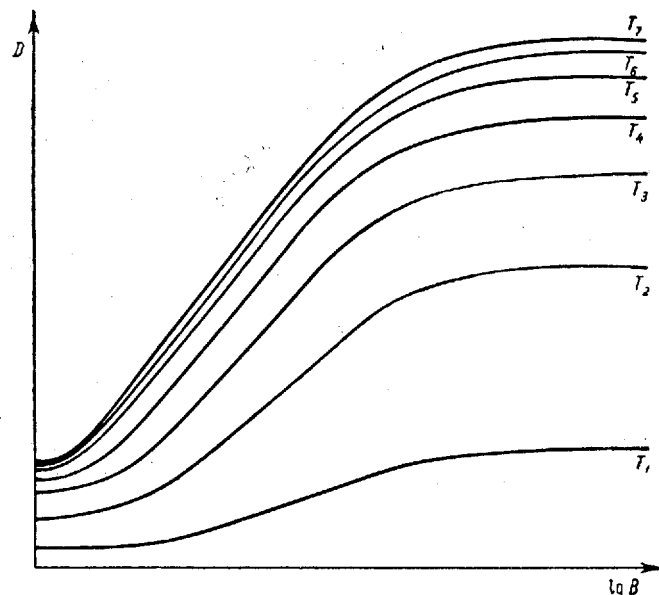


Рис. 16. Изменение характеристической кривой с продолжительностью проявления T .

При решении задач, выдвигаемых экспонетрией, принимаются во внимание нижеследующие параметры: чувствительность фотоматериала S , светосила оптики астрографа $\tau_a D^2/F^2$, коэффициент пропускания светофильтра τ_ϕ , продолжительность выдержки t и яркость фотографируемого объекта B . Комбинации этих параметров, дающие требуемый результат с точностью, вполне достаточной для практики, удовлетворяют условию

$$BSt\tau_\phi\tau_a\frac{D^2}{F^2}=C, \quad (26)$$

где C —некоторая постоянная. Таким образом, при изменении одного из экспонетрических параметров для сохранения на-

личного качества негатива необходимо в обратном отношении изменить какой-либо другой параметр.

Для наблюдателя всегда проще всего менять продолжительность выдержки t . Такое изменение смещает характеристическую кривую вдоль оси абсцисс, причем форма кривой почти не изменяется. К чему это ведет, показано на рис. 17, где яркость самой темной точки объекта отмечена на оси абсцисс точкой B_T , а самой светлой— B_C . Пусть при некоторой продолжительности выдержки t_1 характеристическая кривая занимает на графике положение 1. В этом случае темные части объекта попадают на вуаль и вообще не выйдут на снимке, детали средней яркости приходится на область недодержки и хотя и будут представлены

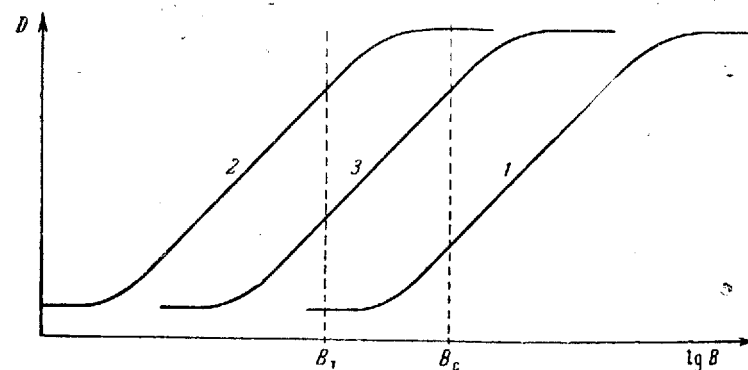


Рис. 17. Перемещение характеристической кривой при изменении продолжительности экспозиции.

на негативе, но с сильно пониженной передачей контраста, так что только наиболее яркие участки диска попадут в область прямолинейной части кривой. В результате получится типичный «недодержанный» негатив. При значительно большей выдержке t_2 вся кривая сдвинется влево и займет положение 2. В этом случае яркие детали диска попадают в область максимальной плотности и сливаются в сплошное темное поле, детали средней яркости, приходясь на зону передержки, выходят очень темными и мало контрастными и только наиболее светлые части диска будут экспонированы нормально. Получается «передержанный» негатив. Наконец, при некоторой промежуточной выдержке t_3 характеристическая кривая 3 располагается так, что ее прямолинейный участок охватывает весь интервал B_C, B_T яркостей объекта и последний передается на негативе наиболее выгодным сочетанием плотностей. Такой негатив называется «нормальным».

Отрезок оси абсцисс, заключенный между точками B_C и B_T и по длине равный $\lg B_C - \lg B_T$, называется *широтой яркостей*

объекта. Отрезок mn (рис. 15), представляющий собою проекцию прямолинейного участка на ось абсцисс, называется *нормальной широтой фотографического материала*, а отрезок lp —*полной широтой* последнего. Очевидно, что получить нормально выдержанное изображение объекта можно только в том случае, если широта его яркостей меньше нормальной широты фотоматериала. Для того чтобы получить хоть какое-нибудь изображение всех частей объекта, необходимо, чтобы широта последнего не превосходила полную широту. Широта яркостей дисков планет и спутников в отличие от таких объектов, как туманности и сол-

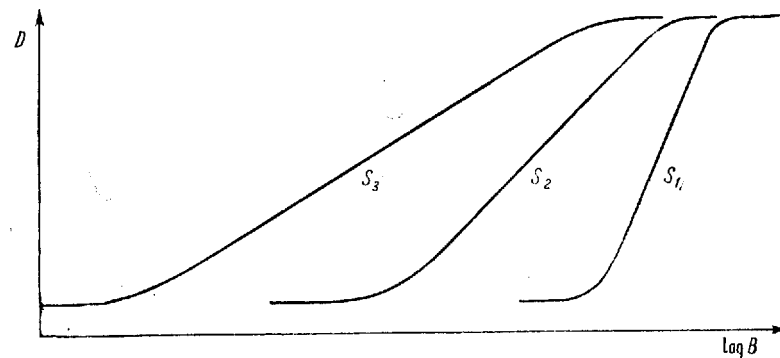


Рис. 18. Передача яркостей объекта на негативе при различной чувствительности и контрастности негативного фотоматериала.

нечная корона, как правило, невелика и потому всегда уменьшается в пределах широты фотоматериала. Исключение составляют такие объекты, как лунный серп с пепельным светом или лунный диск при частной фазе лунного затмения. Получение изображения всех частей лунного диска при указанных условиях на одном обычном снимке невозможно и требует специальных приспособлений—светофильтров-оттенителей и т. п.

Если вести фотографирование данным инструментом при одинаковой выдержке на фотоматериалах разной чувствительности S , то получится картина, представленная на рис. 18. Обращаем внимание читателя на то, что с повышением чувствительности S происходит не только сдвиг кривой влево, но и изменение ее характера в направлении уменьшения крутизны, т. е. снижения γ и увеличения широты. Это не следует принимать абсолютно, поскольку фотографическая промышленность может изготавливать фотоматериалы с весьма различным сочетанием свойств, но все же общее правило состоит в том, что малочувствительные эмульсии имеют высокую контрастность и малую

широту, а высокочувствительные—малую контрастность и большую широту.

В звездной астрономии обычно ограничиваются получением негатива. При исследовании деталей планет позитив часто оказывается выгоднее. Одна из причин этого состоит в том, что на негативе небольшое изображение диска планеты имеет вид темного

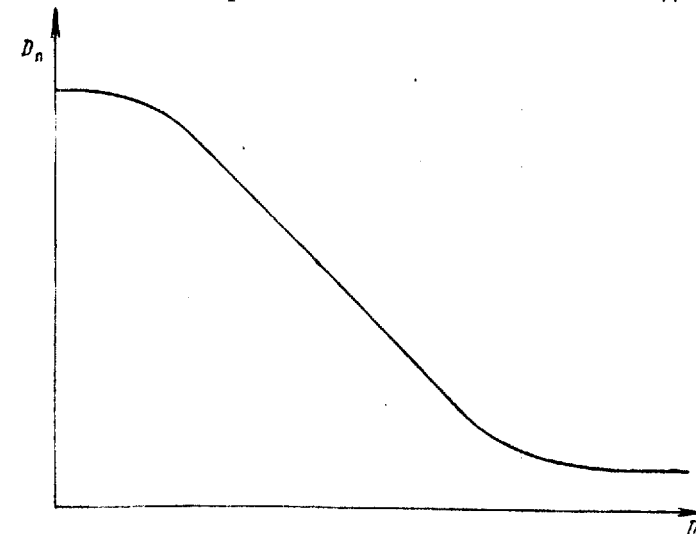


Рис. 19. Характеристическая кривая позитива.

пятна на светлом фоне, а светлый фон гораздо сильнее ухудшает видимость деталей темного объекта, чем темный фон—деталей светлого объекта. Позитив может быть получен как на фотоматериале с непрозрачной подложкой (фотографическая бумага), так и в виде диапозитива на стеклянной пластинке или пленке.

Воспроизведение деталей на позитиве определяется характеристической кривой соответствующего фотоматериала. При построении такой кривой удобно по оси абсцисс откладывать плотности D_n воспроизводимого негатива, по оси ординат—плотность D_p получаемого позитива (рис. 19). При исследовании бумаг плотность принимается равной десятичному логарифму светлоты (см. § 36), взятому со знаком минус.

Фотографию принято считать объективным методом наблюдения. Однако это надо понимать в ограниченной и условной форме. Дело в том, что конечный продукт фотографического процесса—позитив—рассматривается зрением. Поэтому видимость или невидимость некоторой детали на снимке планеты зависит как от физических свойств фотографического изображения, так и от психофизиологических параметров зрения того наблюдателя,

который это изображение рассматривает. Для количественной оценки получаемого результата наибольшее значение имеют два параметра снимка: разделяющая и разрешающая способности.

Под *разделяющей способностью* понимают свойства изображения, позволяющие раздельно увидеть две части этого изображения, очень мало различающиеся по яркости, т. е. составляющие небольшой яркостный контраст, определяемый в соответствии с формулой (15) (стр. 52).

Элементарная теория разделяющей способности фотографического процесса сводится к следующему. Пусть на диске светила имеется темная, резко ограниченная деталь яркости B_2 , расположенная на светлом фоне яркости B_1 , и пусть разность $B_1 - B_2$ мала. При визуальном наблюдении в телескоп, согласно изложенному в § 7, деталь будет видима, если контраст $K = (B_1 - B_2)/B_1$ больше порога контрастной чувствительности зрения ε , и не будет видима, если контраст меньше этой величины. То же самое будет иметь место при рассматривании изображения планеты на позитиве: тут также будет свой предельный контраст (или контрастный порог), не равный, однако, ε . Обозначив его значение через ε_n , мы скажем, что условие видимости объекта на фотографическом позитиве выражается неравенством

$$\frac{B_1 - B_2}{B_1} > \varepsilon_n \quad (27)$$

или

$$Q = \frac{B_2}{B_1} < 1 - \varepsilon_n. \quad (28)$$

Яркости B_1 и B_2 передаются на негативе плотностями D_{1n} и D_{2n} . Пусть мы имеем наиболее выгодный случай, а именно, пусть обе эти плотности лежат на прямолинейном участке характеристической кривой. Тогда

$$D_{1n} - D_{2n} = \gamma_n (\lg B_1 - \lg B_2). \quad (29)$$

Процесс печати позитива естественно подобрать так, чтобы этим плотностям соответствовал прямолинейный участок характеристической кривой позитивного материала. Тогда плотности D_{1n} и D_{2n} на позитивном изображении будут удовлетворять условию

$$D_{2n} - D_{1n} = \gamma_n (D_{1n} - D_{2n}) = \gamma_n \gamma_n (\lg B_1 - \lg B_2). \quad (30)$$

Примем для определенности, что это изображение представляет собою диапозитив. Тогда яркостям B_1 и B_2 объекта будут соответствовать яркости B_{1n} и B_{2n} позитива, определяемые равенствами

$$B_{1n} = B_0 \cdot 10^{-D_{1n}}; \quad B_{2n} = B_0 \cdot 10^{-D_{2n}}, \quad (31)$$

где B_0 — яркость рассматриваемой сквозь диапозитив поверхности или — в случае наблюдения в проекции — яркость экрана при удаленном диапозитиве. Из написанных равенств следует такое выражение для условия видимости объекта на позитиве:

$$Q_n = \frac{B_{2n}}{B_{1n}} = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^{\gamma_n \gamma_n} < 1 - \varepsilon. \quad (32)$$

Используя порог разделяющей способности, выраженный через отношение истинных яркостей формулой (27), мы скажем, что граница между видимостью и невидимостью соответствует значению Q_n , равному

$$(1 - \varepsilon_n)^{\gamma_n \gamma_n} = 1 - \varepsilon. \quad (33)$$

Решая это уравнение относительно ε_n и ограничиваясь членами первого порядка относительно малой величины ε , мы получим:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\gamma_n \gamma_n} \varepsilon. \quad (34)$$

Если бы приведенная выше элементарная теория была вполне правильной, то мы могли бы легко увеличивать разделяющую способность ε_n за счет простого повышения контрастности фотоматериала. Практика показывает, что на самом деле это не так просто. Дело в том, что при выводе равенства (34) мы приняли, что зрительный контрастный порог при рассматривании позитива имеет то же значение ε , что и при визуальном обозрении диска планеты в поле зрения телескопа. В действительности же это не так, поскольку изображение на фотографическом негативе или позитиве обладает рядом физических особенностей, которые существенно отличают его от изображения, наблюдаемого в поле зрения телескопа непосредственно и которые сильно ухудшают восприятие деталей зрением. Из этих особенностей важнейшими являются *фотографическая иррадиация* и *зернистое строение фотографического изображения*.

Под термином «фотографическая иррадиация» понимают расширение почернения на негативе за действительную границу фотографируемого изображения. Передаваемый наружу свет берется от краевых частей самого изображения, которые благодаря этому получают менее темными. В итоге на снимке объект никогда не бывает ограничен резко, но кажется более или менее размытым, поскольку всегда получается зона плавного перехода от плотности изображения к плотности вуали. Схематически это представлено на рис. 20, где пунктирная линия дает ход действительной яркости у края резко ограниченного однородного объекта (искусственный светлый диск, край Луны и т. д.), а сплошная изображает ту воображаемую кривую яркости, которой соответствует ход плотности на негативе. Такая именно кри-

вая получается, если воспользоваться негативом для определения хода яркости по правилам поверхностной фотографической фотометрии. Можно показать, что в рассматриваемом случае объекта равномерной яркости на линии действительного края изображения плотность будет соответствовать яркости, равной половине действительной. Все это вполне аналогично тому, что было описано в § 6 и представлено на рис. 4 для эффекта дифракции, однако зона размытости, вызываемая дифракцией, имея ширину порядка размера дифракционного изображения, состав-

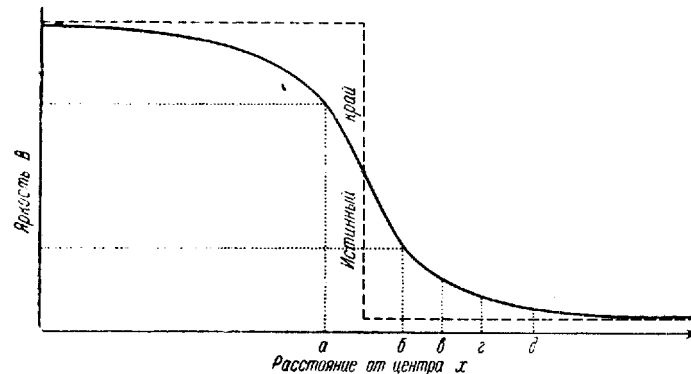


Рис. 20. Эффект фотографической иррадиации. Пунктиром изображен действительный ход яркости, сплошная линия—ход яркости, искаженный иррадиацией.

ляет всего микроны (ср. табл. 4, стр. 43), в то время как ширина переходной зоны, обусловливаемой фотографической иррадиацией, в лучшем случае будет порядка 100 μ , а нередко достигает и целого миллиметра.

В зависимости от продолжительности выдержки и характера проявления граница заметного на глаз почернения будет соответствовать той или иной яркости V объекта. Поэтому при коротких выдержках кажущаяся граница будет лежать внутри истинного контура объекта и размеры последнего будут на снимке преуменьшены (рис. 20, а). В случае достаточно долгой выдержки видимая граница будет лежать вне истинного контура (рис. 20, б) и размеры объекта будут преувеличены. Чем дольше выдержка, тем меньшая яркость даст заметное почернение и тем дальше отодвигается видимая граница от действительной (рис. 20, в, г, д). Иными словами, размер фотографического изображения светлого объекта, видимого на темном фоне, монотонно растет с экспозицией.

В случае фотографического наблюдения планет причиной иррадиации служат несколько явлений. Во-первых, тут проявляет себя

действительная размытость получаемого на эмульсионном слое изображения, обусловленная дифракцией, aberrациями оптики и неточностью фокусировки. Во-вторых, влияет перемещение изображения по эмульсии за время экспозиции вследствие неточного гидирования, вибраций инструмента под влиянием толчков от работы затвора и других сотрясений, а больше всего—от атмосферного дрожания. В-третьих, происходит рассеяние света в самом мутном слое фотографической эмульсии, что составляет неустраняемый недостаток последней. Поэтому значительная иррадиация получается и в том случае, когда оптические и механические источники размытости границы между освещенной и неосвещенной частями эмульсии полностью устранены. Для иллюстрации сказанного на рис. 21 (стр. 91) приведены кривые хода кажущейся яркости у края изображений вполне резких искусственных планет, полученные И. А. Паршиным.

Эффект зернистости получается оттого, что почернение проявленной фотографической эмульсии складывается из отдельных черных точек—зерен металлического серебра или групп таких зерен. Зернистое строение ясно заметно уже при сравнительно небольшом увеличении. Оно придает контуру фотографического изображения, рассматриваемого в лупу, характерную «мохнатость». Очевидно, что объект, размеры которого сравнимы с размерами отдельных зерен и групп зерен или меньше их, не может быть передан на снимке, что делает бесполезными последующее увеличение негатива сверх известного предела и его изучение при помощи микроскопа с сильным увеличением.

В § 6 мы видели, что уже при визуальном наблюдении планеты резкие в действительности контуры несколько размываются за счет эффекта дифракции. На фотографических снимках зона размытости будет в десятки или даже сотни раз шире, а это, как мы знаем, влечет за собой повышение зрительного порога ε . Поэтому в формулах (33) и (34) мы должны заменить параметр ε на произведение $q\varepsilon$, где $q > 1$ представляет собою коэффициент, определяющий повышение порога за счет зернистости и размытости фотографического изображения. Это дает окончательный результат в таком виде:

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{q}{\gamma_{\Pi}} \varepsilon. \quad (35)$$

Коэффициент q растет с плотностью изображения. Этим можно объяснить недавно установленный Г. А. Истоминим факт, что вопреки формулам элементарной теории различные участки прямолинейного отрезка характеристической кривой в смысле выявления мало контрастных деталей неравноценны и что наибольшая разделяющая способность имеет место в нижней части прямолинейного участка при значениях $D \approx 1$ или $D - D_B \approx 0,6$.

С переходом к более высоким плотностям передача мало контрастных деталей ухудшается. Следует также иметь в виду, что q возрастает и с ростом γ , в частности, в силу увеличения контрастности зерна. Из всего сказанного, конечно, не следует, что на снимке планеты нельзя добиться разделяющей способности, одинаковой с тем, что дает визуальное наблюдение или даже превосходящей последнее. Однако это требует применения довольно сложных специальных фотографических приемов, которые будут перечислены в следующем параграфе.

Разрешающая способность выражает свойство фотографического материала изображать как раздельные два очень близких между собою объекта. Она определяется как зернистостью, так и эффектом иррадиации и потому для данного сорта материала сложным образом зависит от плотности изображения и способа проявления.

На практике разрешающая способность выражается количеством отдельных белых полос на черном фоне, которые различаются на протяжении 1 мм. Техника измерения этой величины, называемая *резольвометрией*, состоит в фотографировании в разном масштабе надлежащим образом изготовленных тестов, т. е. моделей, на которых нанесены чередующиеся белые и черные полосы различной ширины.

Фотоматериалы, обычно используемые для планетной фотометрии, имеют разрешающую способность 30—50 линий на 1 мм. Существуют материалы, у которых эта способность доведена до 300 линий на 1 мм, но пользоваться ими в планетной фотографии затруднительно вследствие их низкой чувствительности.

§ 11. Практика фотографирования планет и спутников

Для изучения деталей поверхности планеты или спутника могут быть использованы только снимки, полученные в достаточно крупном масштабе, а потому фотографирование тел солнечной системы необходимо выполнять при помощи весьма длиннофокусных инструментов. Как известно, соотношение между масштабом S изображения небесной сферы на снимке, т. е. числом дуговых секунд, приходящихся на 1 мм негатива, и главным фокусным расстоянием F объектива, выраженным тоже в миллиметрах, представляется формулой

$$C = \frac{1}{F \sin 1''} = \frac{206\,265}{F}. \quad (36)$$

Обратная величина, а именно выраженная в миллиметрах длина d дуги в $1''$, будет выражаться так:

$$d = F \sin 1'' = 0,000004848 F. \quad (37)$$

Практика показывает, что наилучшие результаты получаются при значениях S порядка 10—20" на 1 мм, чему соответствуют значения F примерно от 10 до 20 м. Более длинные фокусные расстояния редко себя оправдывают из-за атмосферного дрожания и, кроме того, невыгодны тем, что заставляют делать слишком длинную экспозицию.

Лучше всего, если необходимый масштаб получается прямо в фокусе объектива большого рефрактора или в кассегреневском фокусе крупного рефлектора. Такие условия можно было иметь, например, при фотографировании при помощи 30-дюймового экваториала Пулковской обсерватории ($F=14$ м) или на 40-дюймовом рефлекторе Симеизской обсерватории. Поскольку такие инструменты уникальны, часто приходится пользоваться телескопами средней силы ($F=3-5$ м), применяя их в сочетании с увеличительной камерой. Как правило, это дает менее хорошие результаты, что объясняется тем, что увеличивающая оптика, во-первых, вносит добавочные aberrации и этим снижает резкость изображения, а во-вторых, вследствие уменьшения относительного отверстия приходится увеличивать продолжительность экспозиции.

Как было указано в предыдущем параграфе, при получении снимка планеты очень важно делать экспозицию такой продолжительности, чтобы изображение попадало на прямолинейный участок характеристической кривой. В практической фотографии для нахождения такой выдержки применяются различные приемы экспонометрического измерения и расчета, основанные на решении уравнения (26) и хорошо известные хотя бы на примере многочисленных экспонометров, выпускаемых для любительской фотографии. Такие приемы можно было бы распространить и на область планетной фотографии, однако большого практического значения это не имеет. Дело в том, что фотографирование планет выполняется в сравнительно постоянных условиях, поскольку яркость объекта—диска планеты—меняется лишь в небольших пределах, инструмент остается без изменений и обширные, охватывающие длительное время серии снимков получаются на одном и том же сорте пластинок. При таких обстоятельствах проще и надежнее подобрать необходимую продолжительность выдержки путем пробной съемки, во время которой получается ряд последовательных экспозиций планеты на одной пластинке, причем продолжительность выдержки увеличивается от одного изображения к следующему в два раза. Такой пробный негатив, находясь под руками во время всего периода наблюдений, позволяет легко делать суждения о целесообразном изменении выдержки при изменившихся условиях.

Учитывая вредный эффект атмосферного дрожания, следует стремиться снимать при минимальной возможной выдержке.

Поэтому необходимо, чтобы инструмент был снабжен хорошим моментальным затвором, позволяющим менять экспозицию в достаточно широких пределах. При пользовании увеличительной камерой целесообразно применять центральный затвор, установленный в объективе этой камеры; при фотографировании непосредственно в фокусе чаще всего употребляют штормый затвор. Если снимки предназначаются для абсолютной фотометрии, необходимо, чтобы продолжительность выдержки была точно известна или, по крайней мере, постоянна в пределах точности не ниже 1% от ее значения. Удовлетворить такому условию довольно трудно; разработка конструкции астрофотографических затворов, сочетающих достаточную легкость с необходимой точностью, является назревшей проблемой.

Применяемая для фотографирования установка должна обеспечивать возможность получения на одном негативе ряда повторных экспозиций объекта. Осуществление последних перемещением всего инструмента не всегда целесообразно, так как ведет к суммированию света небесного фона и дает изображения на различных расстояниях от оптической оси. Последнее особенно нежелательно при пользовании увеличительной камерой. Поэтому кассетная часть должна допускать перемещение пластинки или пленки вдоль поля зрения. Необходимо также иметь достаточное количество запасных кассет и возможность быстро их сменять.

Очень большое значение имеет точная фокусировка, которую надлежит выполнять по методу Гартмана и исправлять по мере изменения температуры в башне, а также при смене светофильтра.

Различение мелких деталей диска требует применения фотографической эмульсии с максимальной разрешающей способностью. С другой стороны, при той небольшой светосиле, какой обладает применяемая для фотографирования планет аппаратура, съемка с короткой выдержкой возможна только на пластинках с достаточно высокой чувствительностью. Кроме того, при фотографическом наблюдении (как и при визуальном) резкость изображения часто повышается при диафрагмировании объектива, которое еще более снижает светосилу. В итоге наблюдателю приходится идти на компромисс, довольствуясь умеренной разрешающей способностью, не слишком короткой выдержкой и сравнительно большой диафрагмой. Практика и опыт позволяют нащупать ту комбинацию этих трех элементов, которая при данной степени спокойствия изображения дает наилучшие результаты.

Поскольку при съемке планет речь идет о получении изображений ярких протяженных объектов, фотографический ореол, возникающий вследствие отражения света от обратной стороны стекла пластинки, может сильно испортить снимок. Это заставляет пользоваться пластинками с защитным противоореольным слоем.

Проявление негативов надо вести при помощи одного из проявителей, дающих мелкое зерно («Финал», рецепты с бурой и др.). Желательно доводить проявление до максимального значения коэффициента контрастности, но высоких плотностей изображения планеты, и особенно вуали, необходимо избегать.

Предосторожности, рекомендуемые в негативном процессе, полностью распространяются и на позитивный процесс. Получение позитивов планет почти всегда осуществляется с увеличением. Оптика увеличителя вносит свои дополнительные аберра-

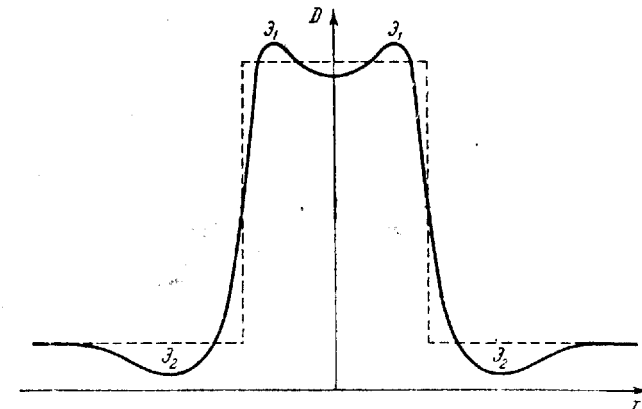


Рис. 21. Зона постепенного перехода кажущейся яркости у резкой в действительности границы изображений двух объектов, создаваемая фотографической иррадиацией. Пунктир—идеальная кривая, сплошная линия—реальная кривая, искаженная эффектом Эбергарда. (По измерениям И. А. Паршина.)

ции, и в ней тоже происходит рассеяние света, снижающее контрастность изображения. Это, с одной стороны, увеличивает множитель q формулы (35), а с другой—ведет к отступлению от равенства (30) в невыгодную в смысле передачи деталей сторону. Содержание оптики увеличителя в идеальной чистоте, ее точная фокусировка, абсолютная темнота в помещении, где производится печатание, и другие мероприятия того же рода позволяют снизить до минимума помехи, сопровождающие получение увеличенных позитивов.

Как было указано выше, наиболее целесообразно получать диапозитивы на прозрачной подложке. Их потом рассматривают или просто в лупу на фоне яркой белой поверхности, или в проекции на экране. Для этого удобна проекционная установка, выпускаемая заводом ГОМЗ под названием «спектропроектор».

При оценке и интерпретации видимой на позитиве картины следует иметь в виду, что, кроме зернистости и фотографической иррадиации, фотографическому изображению свойственны еще многие другие эффекты, способные исказить воспринимаемую зре-

нием картину. Важнейшим из них является *эффект Эбергарда*. Он состоит в следующем.

Если со всеми предосторожностями получить на негативе изображение небольшого вполне резкого и вполне однородного круглого диска, то плотность на этом изображении не будет везде одинаковой. Как правило, на краю она будет несколько выше, чем в центральных частях, что на рис. 21 выражено волной $\mathcal{E}_1$. В то же время в зоне вуали, примыкающей к краю изображения, получается снижение плотности, выраженное на рис. 21 минимумом $\mathcal{E}_2$. Все эти явления объясняются распределением проявителя и продуктов проявления (бромидов) по полю изображения. Общее правило тут состоит в том, что на краю изображения, примыкающем к менее плотному полю, плотность несколько повышается, а на краю, граничащем с более плотным полем, — понижается. Это ведет к появлению фиктивных темных каемок и светлых ободков на границах изображений, сильно различающихся по плотности.

Аналогичную природу имеет также эффект, открытый С. К. Костинским. Он состоит в том, что край небольшого и не очень плотного изображения, расположенного рядом с полем высокой плотности, несколько срезается, что ведет к кажущемуся удалению этого изображения от поля.

Специфические особенности, свойственные фотографическому изображению, и в первую очередь сравнительно низкая разделяющая и разрешающая способности применяемых в настоящее время фотоматериалов, ведут к тому, что в смысле выявления тонких деталей планетного диска фотография значительно уступает визуальному наблюдению. Мелкие детали, легко различимые при непосредственном рассматривании планеты в окуляр, на снимке, полученном этим же телескопом, обычно совсем не заметны, более крупные детали хотя и различаются, но много хуже, чем при визуальном наблюдении. Это заставляет искать пути к повышению эффективности фотографических наблюдений планет. С этой целью предложены и часто применяются различные специальные приемы съемки и последующей обработки полученных негативов. Важнейшие из них сводятся к следующему.

1. Получение очень большого количества изображений диска планеты при кратчайшей возможной выдержке, для чего удобнее всего применить пленочную кассету примерно того типа, какой используется в любительских пленочных фотоаппаратах или в киносъемочных и аэросъемочных камерах. Это дает возможность распространить на фотографическое наблюдение прием, всегда употребляемый при визуальном наблюдении и состоящий в использовании моментов временного успокоения изображений. При достаточно большом количестве снимков некоторые из них попадут на такие моменты

и дадут лучшее воспроизведение деталей. Недостатком метода является то, что эти «лучшие» изображения планеты потом отбираются просто на глаз, что создает почву для субъективизма и произвола. Особо следует отметить, что наибольшая резкость снимка может отнюдь не соответствовать наименьшему смещению деталей по отношению к краям диска, вызываемому дрожанием.

2. Сопровождение съемки визуальным наблюдением планеты, что позволяет делать экспозиции только в моменты наилучших изображений. Последнее избавляет от получения огромного количества плохих изображений, неизбежного при предыдущем методе съемки.

В простейшем случае визуальное наблюдение осуществляется через гид астрографа, однако неоднократно указывалось, что это не обеспечивает выбора наилучших моментов, так как последние даже в рядом расположенных телескопах могут не совпадать. По этой причине а также вследствие отсутствия гида на обычных больших рефракторах и рефлекторах чаще пользуются наблюдением за самим снимаемым изображением. Для этой цели устраивают боковой окуляр, в который часть светового потока направляется путем отражения от плоско-параллельной стеклянной пластинки, установленной под углом в 45° к оптической оси недалеко от фокуса. Поскольку такая пластинка вносит свои аберрации и тем ухудшает качество фотографируемого изображения, иногда используют другой прием, состоящий в рассматривании при помощи сильной лупы или слабого микроскопа изображения планеты непосредственно на эмульсионном слое пластинки. При отсутствии противоореального слоя это осуществляется проще всего путем наблюдения пластинки на просвет с обратной стороны при помощи окулярного устройства, приделанного к задней крышке кассеты.

3. Гидирование при съемке с более длительной экспозицией. Прием состоит в том, что наблюдатель, рассматривая визуально фотографируемое изображение,двигающееся в поле зрения вследствие дрожания, стремится перемещать пластинку вслед за ним. Поскольку быстрые перемещения большого тяжелого телескопа затруднительны, применяют специальную легкую кассету, легко перемещаемую по двум координатам («кассета Ричи»). Однако смещения изображения, вызываемые дрожанием, быстры и незакономерны, а потому применение такой кассеты требует известной ловкости и сноровки, но и при наличии у наблюдателя этих качеств удастся следовать лишь за смещениями не слишком короткого периода. Поэтому большой интерес представляет разработка приспособления, выполняющего перемещение кассеты автоматически. Удачные опыты, выполненные в этом направлении, были описаны Лейтоном.

4. Съемка в узких участках спектра, выделяемых при помощи светофильтров. Фотоматериалы, имеющиеся в настоящее время, позволяют фотографировать в любом спектральном участке в пределах от 300 до 1000 м μ . В случае линзовой оптики возникают затруднения, связанные с хроматизмом, а также со значительным поглощением ультрафиолетовой радиации стеклом. Эти затруднения остаются и при наблюдениях на рефлекторе, применяемом в сочетании с линзовой увеличительной системой. Поэтому желательно иметь длиннофокусные системы с чисто зеркальной оптикой.

Высокая эффективность съемки планет в узких спектральных участках общеизвестна благодаря ряду открытий, сделанных этим методом. Достаточно вспомнить пионерские работы Г. А. Тихова по исследованию Марса, выполненные в 1909 г., позднее открытие Райтом фиолетовых облачных образований на той же планете в 1924 г., открытие Россом ультрафиолетовых деталей на диске Венеры и др.

Дальнейшее развитие этого метода должно идти в направлении перехода к настоящей монохроматической съемке, для чего можно было бы использовать установки типа внезатменного коронографа. Особенный интерес представляла бы съемка в длинах волн, соответствующих широким полосам поглощения газов атмосферы планеты (метан и аммиак для внешних планет, углекислый газ для Венеры и т. д.). Большой интерес представляет также расширение используемого для наблюдений спектрального интервала. Распространение в сторону ультрафиолета ограничено поглощением в земной атмосфере, но в сторону инфракрасных лучей можно идти очень далеко, для чего следует применять спектральные приспособления типа электронно-оптического преобразователя.

5. Применение цветной фотографии. Снимок, передающий изображение планеты в его естественной окраске, представляет большую ценность, особенно, если речь идет о небесном теле с большим разнообразием цвета (Марс, Юпитер, лунное затмение). К сожалению, работ по цветной фотографии планет пока выполнено немного. Отметим двухцветную съемку Марса, выполненную Г. А. Тиховым в 1909 г. в Пулковке, удачные снимки Марса и Луны, полученные Н. П. Барабашевым в Харькове в 1951—1953 гг., а также цветные изображения Марса, Юпитера и Сатурна, полученные в большом масштабе Лейтоном путем применения автоматической следящей кассеты. Следует иметь в виду, что распространенный сейчас метод цветной фотографии допускает очень значительные изменения цвета при обработке негатива и получении позитива. Можно сказать, что способ печати специально подбирается так, чтобы получилось изображение, возможно более «похожее» на оригинал, т. е. соз-

дающее у зрителя ожидаемое впечатление. Поэтому и цветные снимки планет пока лишены объективности и имеют в основном иллюстративное значение.

Большой интерес представляют методы цветной съемки, основанные на принципе усиленного цветоразделения, т. е. дающие заведомое преувеличение цветности. Они позволяют обнаруживать ничтожные цветовые различия, незаметные как на обычных снимках, так и при непосредственном визуальном наблюдении планеты. Наиболее эффективные результаты дает фотографирование объекта в двух удаленных спектральных участках (например, в ультрафиолетовом и инфракрасном) и последующее объединение обоих негативов в одном позитиве, полученном по методу двухцветной печати. В этом случае оба участка спектра, невидимых для глаза, условно передаются на позитиве двумя видимыми цветами. Например, инфракрасное излучение может быть передано красным или желтым цветом, ультрафиолетовое — зеленым или синим. В результате получается условное изображение объекта, на котором участки с повышенной инфракрасной интенсивностью имеют красноватую окраску, а с избытком ультрафиолетового излучения — зеленоватую. Такой метод особенно ценен в деле изучения объектов с незначительными различиями цвета, в частности лунной поверхности. Примером удачного применения этого метода могут служить известные двухцветные репродукции лунного диска, опубликованные Мите и Зигертом.

6. Применение печати с повышенной контрастностью. Как было объяснено в предыдущем параграфе, детали планетного диска, невидимые благодаря недостаточной контрастности, могут быть сделаны видимыми за счет повышения контрастности фотографического изображения. Уже простое фотографирование на негативном материале и его печатание на позитивном материале, характеризующихся значениями γ , превышающими единицу, может значительно улучшить видимость мало контрастных деталей. Дальнейшее повышение контрастности может быть получено путем многократной перепечатки одного и того же изображения с негатива на позитив, с последнего опять на негатив, потом опять на позитив и т. д. Если коэффициент контрастности каждого такого этапа равен γ , то в результате n пересъемок он повысится до значения γ^n . Однако эффективность такого метода ограничена тем, что при его применении возрастает контрастность не только интересующих нас истинных деталей планетного диска, но и всех дефектов исходного негатива, в частности зерна эмульсии.

7. Метод многократной печати или контратипирования. Для того чтобы повышать контрастность деталей на планете, не увеличивая вместе с тем контрастности дефектов, применяют соединение в одном позитиве изобра-

жений нескольких негативов. Технически это можно осуществить так: несколько негативов складывают вместе, чтобы изображения на них были точно совмещены, и печатают сквозь такой составной негатив. Второй прием состоит в том, что, печатая на увеличителе, поочередно проектируют на одно и то же место позитива изображения разных негативов с соответствующими короткими экспозициями, в сумме составляющими экспозицию нормальной продолжительности. Третий метод представляет собою комбинацию двух предыдущих и состоит в том, что пачки из небольшого числа сложенных вместе негативов (например, по три-четыре) поочередно проектируются при печатании позитива.

Огромное преимущество такого способа получения позитивов состоит в том, что контрастность зерна и случайных дефектов снижается, поскольку на разных негативах последние расположены различно, в то время как контрастность реальных объектов, изображения которых присутствуют на всех сочетаемых негативах, возрастает. Это позволяет обнаруживать крупные детали очень малого контраста. Однако мелкие детали при этом методе не усиливаются и часто даже, наоборот, замываются, так как благодаря дрожанию они на разных негативах имеют несколько различное положение. В результате осреднения маленькая резкая деталь расплывается в большое бледное пятно.

8. Метод повышения контраста с одновременным устранением общего градиента яркости. Способы повышения контраста, описанные выше, иногда бывают невыгодны тем, что они усиливают прежде всего естественный градиент яркости на планетном диске, например потемнение к краю или к терминатору. Отдельные частные детали, например мало контрастные облака, имеющие тот же ход яркости к краю, что и окружающий фон, при этом остаются невыявленными. Кроме того, краевые части с повышением контрастности выходят за пределы нормальной ширины позитива. В этих случаях прибегают к печати в таких условиях, при которых снижение яркости к краю и к терминатору искусственно устраняется. Технически это осуществляется при помощи специального светофильтра-оттенителя или фотометрического клина с такой константой, которая устраняет общий ход яркости и этим позволяет сильно увеличивать контрастность, сохраняя все части изображения в пределах полезной ширины позитива. Применение такого метода позволило получить фотографические изображения диска Венеры с пятнами, непосредственно на позитивах и негативах невидимыми.

9. Киносъемка. Такие явления, как вращение Марса и Юпитера вокруг оси, изменение наклона колец Сатурна к линии зрения наблюдателя, перемены фазы и видимого углового поперечника Венеры, могут быть очень наглядно запечатлены

на кинофильме, кадры которого сняты с таким интервалом, чтобы ускоренное прохождение пленки-позитива давало картину явления с необходимым коэффициентом ускорения. Попытки создания таких кинофильмов предпринимались много раз. В дальнейшем можно ставить вопрос о такой киносъемке, которая позволила бы наглядно представлять и изучать изменения на поверхности Юпитера, Марса и другие явления того же рода.

Общий итог применения всех перечисленных приемов сводится к тому, что при фотографировании планет в наилучших атмосферных условиях объективом с исчезающе малыми аберрациями и на специально подобранных фотоматериалах удастся получать позитивные изображения планет, которые по разделяющей способности превосходят визуальное наблюдение и потому позволяют обнаруживать детали со столь малым контрастом, какой зрением человека не распознается. Что касается разрешающей способности, т. е. воспроизведения малых по угловым размерам деталей, то тут фотографический метод наблюдения пока визуальному уступает, и только создание новых фотоматериалов, сочетающих очень высокую разрешающую способность с достаточной чувствительностью, сможет изменить это положение.

Литература к главе II

§ 6

- Гершун А. А., Об оценке оптических приборов по видимости деталей. Докл. АН СССР 33, № 9, 494—495, 1941; 34, № 1, 22—25, 1942; 34, № 2, 58—60, 1942.
 Димитров Г. и Бэкер Д., Телескопы и принадлежности к ним, Гостехиздат, 1947.
 Максutow Д. Д., Астрономическая оптика, Гостехиздат, 1946.
 Мельников О. А., Оптика и механика линзовых и зеркальных телескопов. Курс астрофизики и звездной астрономии, т. I, гл. II и III (стр. 39—131), Гостехиздат, 1951.
 Муратов С. В., Телескоп, его устройство и действие, Л., 1925.
 Струве Г., О влиянии дифракции телескопа на светлый диск, Изв. АН, серия 7, 30, № 8, 1882.
 Тудоровский А. И., Теория оптических приборов, т. I, Изд. АН СССР, 1943.
 Danjon A. et Couder A., Lunettes et telescopes, 1936.

§ 7

- Зрительные ощущения и восприятия (сб. статей), Соцэкгиз, 1935.
 Кравков С. В., Глаз и его работа, Изд. АН СССР, 1950.
 Кравков С. В., Цветовое зрение, Изд. АН СССР, 1951.
 Пиотровский М. Ю., Глаз как физический прибор, Госиздат, 1928.
 Сытинская Н. Н., Исследование порога контрастной чувствительности зрения, Журн. техн. физ. 12, 371—378, 1942; Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., № 3, 116—120, 1942; Учен. зап. Ленингр. ун-та, № 116, 158—173, 1949.

- Шаронов В. В., Видимость далеких предметов и огней, гл. II, VII, IX, Военмориздат, 1944.
Шаронов В. В., Измерение и расчет видимости далеких предметов, гл. I, II, VII, Гостехиздат, 1947.

§ 8

- Васильев А. Н., Инструкция для наблюдений атмосферного режима, Русск. астрон. календарь, пост. часть, 4-е изд., 410—414, 1930.
Данжон А. и Куде А., Атмосферное волнение, Астрон. журн. 17, № 1, 1940.
Добронравин П. П., Марков А. В., Никонов В. Б., Харадзе Е. К., Программа и результаты наблюдений по выбору места горной астрономической обсерватории, Бюлл. Астрон. ин-та, № 28, 87—94, 1931; № 29, 95—102, 1931; № 31, 119—129, 1932; № 38, 313—360, 1935.

§ 9

- Бронштэн В. А., Инструкция для наблюдений планет, 1948.
Воронцов-Вельяминов Б. А., Санютин Н. П. и Федынский В. В., Инструкция для наблюдений планет. Русск. астрон. календарь, пост. часть, 4-е изд., 308—322, 1930.
Шаронов В. В., Новый способ улучшения визуальных наблюдений планетных дисков, Астрон. циркуляр № 152, 13—14, 1954.
Lyot B., Planetary and solar observations on the Pic du Midi in 1941, 1942 and 1943, Astrophys. Journ. 101, 255—259, 1945; L'Astronomie 67, 3—21, 1953.

§§ 10 и 11

- Ангелер Б., Научная фотография, Изд. Кубуч, 1933.
Баранов С. Г., Вопросы теории фотографического воспроизведения, Госкиноиздат, 1949.
Гольдберг Е., Образование фотографического изображения, Изд. «Огонек».
Гороховский Ю. Н. и Бартенева О. Д., Атлас спектральных свойств современных фотографических материалов, Изд. Гос. оптич. ин-та, 1942; Журн. техн. физ. 12, 1942.
Гинзбург В. А., Светофильтры, ОНТИ, 1936.
Истомин Г. А., Разрешающая способность фотографирующей системы при малых значениях контрастности, Докл. АН СССР 82, № 6, 1952; 84, № 2, 1952; 85, № 5, 1952.
Мертц К. Л., Цветная фотография, Госкиноиздат, 1949.
Миз К., Теория фотографических процессов, ИЛ, 1952.
Паршин И. А., О влиянии диафрагмирования объектива на качество фотографического изображения планет, Учен. зап. Ленингр. ун-та, № 136, 215—224, 1951.
Чибисов К. В., Теория фотографических процессов, т. I, Кинофотоиздат, 1935.
Фас В. А., Светофильтры, Кинофотоиздат, 1936.
Шаронов В. В., Фотографическая иррадиация и ее влияние на снимки планетных дисков, Астрон. журн. 27, 116—122, 1950.
Шаронов В. В., Общая теория визуальной и фотографической видимости деталей планетного диска, Вестник Ленингр. ун-та 9, № 11, 33—46, 1954.
Edson B., Resolving power in planetary photographs, Publ. Astron. Soc. Pacific 49, № 291, 281—282, 1937.
Leighton R., Concerning the problem of making sharper photographs of the planets, Scient. Americ. 194, № 6, 156—166, 1956.

ГЛАВА III

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 12. Диск и фазы шарообразного тела

Для невооруженного глаза все планеты имеют вид звездообразных или точечных небесных объектов, что является естественным следствием их малых угловых размеров. Действительно, из данных табл. 7 (стр. 140) следует, что угловой поперечник всех планет лежит ниже указанного в § 7 порога остроты $\delta_n = 1'$. Исключение составляет Венера, диаметр которой в условиях шнжного соединения может доходить до $64''$. Благодаря этому Венеру можно видеть невооруженным глазом при ее прохождении по солнечному диску в виде черной точки. Известны случаи, когда люди с исключительно высокой остротой зрения могли видеть невооруженным глазом и фазы Венеры.

Уже первые телескопические наблюдения Галилея позволили рассмотреть планеты в виде дисков. Для того чтобы это сделать уверенно, необходимо, чтобы угловой поперечник объекта в поле зрения телескопа составлял около $10'$. Отсюда легко подсчитать то увеличение, которое необходимо для распознавания диска той или иной планеты.

В настоящее время в виде дисков могут наблюдаться восемь больших планет (все, кроме Плутона), четыре наиболее крупных астероида (Веста, Паллада, Церера и Юнона) и шесть спутников (Луна, Ио, Европа, Ганимед, Каллисто и Титан), всего 18 объектов. Есть сообщения о случаях наблюдений дисков и ряда других малых тел из числа астероидов и спутников (например, Рея), но в условиях видимости, близкой к порогу восприятия, в таких случаях всегда бывает трудно отличить действительный диск объекта от дифракционного диска.

В дальнейшем под термином *диск* мы будем понимать проекцию тела планеты или спутника на небесную сферу. Видимая часть диска бывает ограничена с одной стороны проекцией истинного края тела объекта, называемой *лимбом*, а с другой — проекцией границы между освещенной (дневной) и неосвещенной (ночной) частями небесного тела, называемой *терминатором*.