

Photographic Science  
Earl N. Mitchell  
The University of North Carolina  
at Chapel Hill  
John Wiley & Sons  
New York Chichester Brisbane  
Toronto Singapore

## Э. Митчел Фотография

Перевод с английского канд. физ.-мат. наук М. В. Фоминой  
под редакцией  
канд. искусств. А. Г. Симонова



Москва «Мир» 1988

М67 УДК 535.6

Митчел Э.

М67 Фотография: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 420с., ил. ISBN 5-03-000742-3

В книге автора из США подробно рассмотрены физические вопросы фотографии, основные типы современных камер, применение различных фотографических оптических систем, принципы макрофотографии и другие вопросы. Книга хорошо иллюстрирована схемами, графиками, фотографиями. К каждой главе даются вопросы для самопроверки, текст поясняется многочисленными примерами и методами решения практических задач.

Для широкого круга читателей, интересующихся вопросами фотографии

М

3103000000—011 041(01)—88

219—88, ч. 1

ББК 37.940.2

*Редакция литературы по новой технике и космическим исследованиям*

ISBN 5-03-000742-3(русск.) ISBN 0-471-09046-8 (англ.)

© 1984, by John Wiley & Sons, Inc All Rights Reserved Authorized translation from English language edition published by John Wiley & Sons, Inc

© перевод на русский язык, «Мир», 1988

Предисловие редактора перевода

Знание теоретических основ фотографии необходимо каждому фотографу — как профессиональному, так и любителю — для успешного претворения своих творческих замыслов. Именно этим основам и посвящена книга, которая поможет изучению технических средств, процессов и уяснению основных понятий.

Предлагаемая читателю книга Э. Митчела представляет собой теоретический курс фотографии, составленный на основе лекций, прочитанных автором в Университете шт. Северная Каролина (США). Программа курса включает в себя вводный раздел, основы оптики, процессы зрительного восприятия и фотографической регистрации, описание источников света и основ цветной фотографии. Наряду с традиционными черно-белым и цветным фотографическими процессами в книге уделяется внимание обращаемому и диффузионному (одноступенчатому) процессам, а также другим способам получения изображения.

В предисловии к книге автор пишет, что он глубоко убежден в том, что если учащийся понимает суть происходящих процессов, то он может более эффективно использовать имеющиеся возможности для решения поставленных изобразительных задач.

В первой части автор приводит краткий обзор истории возникновения и развития фотографии, излагает общую схему фотографического процесса, кратко останавливается на изобразительных аспектах фотоснимка.

Вторая часть посвящена основным законам оптики, в ней излагаются различные aberrации и способы их коррекции, принцип просветления и требования к объективу, приводятся расчеты глубины резко изображаемого пространства, КПД затворов и эффективного времени экспонирования.

Изложению процесса зрительного восприятия, а также процессу получения фотоизображения посвящена следующая часть книги, в которой читатель может ознакомиться с основными условиями, от которых зависит качество фотоотпечатка, начиная строением фотоматериалов и кончая основными понятиями в области сенситометрии и экспонометрии, включая зонную систему экспонирования.

В заключительной части дано описание источников света, используемых в фотографии, основ цветоведения, применения различных светофильтров. Книгу завершают краткий словарь терминов и предметный указатель.

Текст книги написан ясным, доходчивым и вместе с тем научно точным языком, его дополняют и поясняют многочисленные рисунки, таблицы и фотографии, многие из которых выполнены автором. По каждой теме приводятся типовые задачи и их решения, а в конце каждой главы даны контрольные вопросы для самопроверки. В книге затрагиваются наиболее важные, существенные проблемы, имеющие практическое значение. Суть описываемых процессов и явлений раскрывается на конкретных, убедительных примерах. Так, например, читатель знакомится с теорией и практикой применения светофильтров вообще и возможностями использования поляризационного светофильтра в ряде конкретных случаев, созданием определенного эффекта с помощью диффузионного светофильтра и компенсацией цветовых температур при цветной фотосъемке, проверкой неактиничности света фонаря в своей фотолаборатории и т. д.

В целом книга представляет собой четкое и законченное изложение основных принципов фотографии на современном уровне развития и может стать полезным пособием не только фотографам-практикам, но и преподавателям, научным работникам, а также всем тем, кто изучает эту область знаний, использует фотографию как средство для решения самых различных задач.

*A. Симонов*

## Предисловие

*Эта книга посвящается Россу Скрголу, который обучил меня многим приемам фотографии.*

В книге отражен десятилетний опыт преподавания автором курса фотографии на факультете физики и астрономии Университета шт. Северная Каролина (США). Она написана на основе односеместрового курса лекций по фотографии, читаемого студентам выпускного курса, не имеющим опыта фотографирования. Вот почему в книге основное внимание уделено черно-белой (монохромной) фотографии. Курс лекций сопровождается практическими занятиями, на которых студенты обучаются основным приемам и методам фотосъемки, обработки фотопленки и печати. Существует практическое руководство, дополняющее лекционную часть курса. Кроме черно-белой фотографии в книге рассмотрены основные вопросы цветной фотографии в объеме, достаточном для того, чтобы у студентов не возникало затруднений на практике.

По моему мнению, студент, разбирающийся в устройстве фотоаппарата, сможет им пользоваться с большей эффективностью, чем студент, умеющий только «нажимать кнопку». Это особенно важно при фотосъемке в нестандартных условиях. Поэтому в книгу был включен более подробный материал по сравнению с тем минимумом знаний, который необходим для «механического» фотографирования. Более того, была предпринята попытка объяснить процессы, лежащие в основе образования изображения. Книга достаточно полно раскрывает все аспекты фотографии и потому может быть полезна преподавателям курсов фотографии и фотографам-практикам, желающим глубже понять вопросы теории.

Книга разделена на четыре части. Первая называется «Предварительные сведения» и предназначена для того, чтобы ознакомить читателя с общими представлениями о фотографии. В гл. 1 представлена краткая история развития фотографии. Более подробно история фотографии изложена в книгах Б. Ньюхолла<sup>2</sup> и Р. Тафта<sup>3</sup>. Гл. 3 знакомит читателя с основами композиции. Без ущерба для понимания материала книги гл. 1 и 3 могут быть при чтении опущены, но, как показала практика, студенты считают этот материал весьма интересным. Цель ч. 1 -- как можно быстрее научить читателя фотографировать.

1) T. Haywood, E. Mitchell, Laboratory Manual for Photographic Science, New York, John Wiley & Sons, 1984

2) B. Newhall, The History of Photography, New York: The Museum of Modern Art, 1964.

3) R. Taft, Photography and American Scene, New York: Dover Publications, 1938.

В ч. 2. рассмотрены вопросы оптики применительно к фотографии, чтобы помочь читателю лучше понять устройство фотоаппарата и соответственно более эффективно им пользоваться. В ч. 3 рассмотрен механизм процессов образования изображения с участием галогенидов серебра. Цель ч. 3 — научить начинающего фотографа правильно определять экспозицию и получать негативы и фотоотпечатки хорошего качества. Четвертая часть книги посвящена источникам света, цвету, цветной фотографии и светофильтрам. Изучив эту часть, читатель может дополнить полученные сведения по черно-белой фотографии общими представлениями о цветной фотографии.

Включенный в книгу словарь терминов предназначен для того, чтобы помочь понять

используемые в книге термины. Определения, приведенные в этом словаре, представляют те значения термина, в котором он используется в книге.

В подготовке книги к изданию участвовало много специалистов. Р. Скргл поделился со мной своими обширными знаниями и обсудил многие вопросы, излагаемые в книге. Также были очень полезными критические замечания и других преподавателей нашего курса фотографии — Дж. Кроуфорда, Т. Хейвуда, Л. Робертса, Д. Шроера. Гл. 7 и 11 были прочитаны Л. Слифкином, а Дж. Диксон отредактировал текст с точки зрения стилиста, преподавателя и фотографа-любителя. В. Нейе прочитал всю рукопись и сделал ряд ценных предложений, позволивших улучшить стиль книги. Р. Андерс оказал огромную помощь, поделившись со мной своими знаниями современных фотоматериалов и оборудования. Л. Хау и Дж. Хамборски вместе со своими ассистентами проделали всю необходимую работу в фотолаборатории при подготовке иллюстраций. Все схемы и графики выполнены Дж. Данфи (Университет шт. Северная Каролина), который квалифицированно переделал все мои эскизы. Моя жена Марлис Митчел последние 28 лет терпеливо выполняла функции секретаря, ассистента фотографа и модели во время экспедиций, которые позволили мне повысить профессиональный уровень и получить некоторые фотографии, приведенные в этой книге. И наконец, Ц. Ховард многократно перепечатывала текст книги. Приношу всем перечисленным свою благодарность.

Э. Митчел

## Часть 1. Предварительные сведения.

### Глава 1. История фотографии

#### Предшественники фотографии

Первым устройством, используемым для проецирования и копирования изображений, была *камера-обскура*. В своей первоначальной форме она представляла собой затемненную комнату с отверстием в одной из стен. Изображения предметов, находящихся вне комнаты, проецировались через отверстие на противоположную стену, и люди, находящиеся в комнате, могли наблюдать эти изображения и переносить их на бумагу (рис. 1.1). Время изобретения камеры-обскуры неизвестно, но уже в XI веке она использовалась для наблюдения за солнечным затмением и о ней знал Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.). Приблизительно в XVI веке камера-обскура изготавлялась в виде светонепроницаемого ящика. Итальянский математик и физик Джироламо Кардано (1501—1576 гг.) установил в нее линзу, а изображение с помощью зеркала проецировал на матовую стеклянную пластинку. Полученное изображение можно было обвести на бумаге (рис. 1.2).

Люди стали использовать стеклянную линзу очень давно. Впервые она была обнаружена в руинах Ниневии, разрушенной Вавилоном в 612 г. до н. э. Возможно, стеклянные линзы впервые использовались для улучшения зрения еще до начала XIV века. Джордано Пиза пропагандировал их применение в проповеди в 1306 г. и указывал на значение открытия стеклянных линз двадцатью годами раньше.

Хотя, используя камеру-обскуру, изображения можно было фиксировать на бумаге или наблюдать, возникла потребность в более простом способе регистрации изображений.

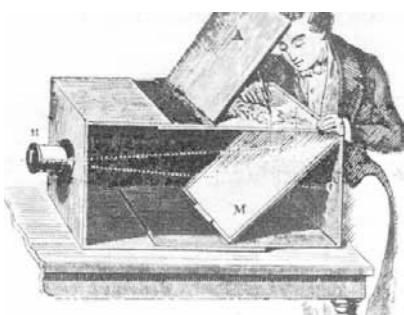
Рис. 1.1.

Одна из первых камер-обскур (Международный музей фотографии Дж. Истмена)



Рис 1-2.

Создание рисунка с помощью камеры-обскуры (Международный музей фотографии Дж. Истмена)



В 1826 г. французский изобретатель Нисефор Ньепс применил асфальт для регистрации высококонтрастных изображений. Асфальт, обычно растворимый в лавандовом масле, становится нерастворимым после воздействия света. В одном из своих экспериментов Ньепс наносил раствор асфальта в лавандовом

масле на полированную оловянную пластинку, которую выставлял на солнечный свет под полупрозрачным штриховым рисунком. В местах пластиинки, находившихся под непрозрачными участками рисунка, асфальтовый лак практически не подвергался воздействию солнечного света и после экспозиции растворялся в лавандовом масле. После дальнейшего травления и гравирования покрывали краской.



Рис. 1.3.

«Вид из окна» — один из первых снимков, полученный в 1826 г. Н. Ньепсом методом гелиографии (коллекция Гернхейча, Центр гуманитарных наук, Остинский университет, шт. Техас)

Свет задубливал лак в освещенных местах, а лавандовое масло вымывало незадубившиеся участки лака, в результате чего возникало рельефное изображение, которое использовалось как клише для получения копий с оригинала. Покрытые лаком пластиинки также применялись вместе с камерой-обскурой для формирования прочных светописных изображений. Этот способ получения изображений

назван гелиографией (рис. 1.3).

#### Дагерротипия

В 1727 г. немецкий физик Иоганн Шульце обнаружил, что некоторые соли серебра темнеют под действием солнечного света. Томас Уэджвуд, сын английского гончара Д. Уэджвуда, использовал нитраты серебра для получения копий рисунков на стекле после экспонирования солнечным светом. Но он не знал способа закрепления изображения Хэмфири Дэви опубликовал результаты этих экспериментов в 1802 г.<sup>1)</sup> Ньепс для получения фотоизображения также проводил опыты с солями серебра. В 1829 г. вместе с французским художником Дагером он начал работу по усовершенствованию гелиографии. К тому времени Ньепс модифицировал процесс гелиографии: наносил слой серебра на металлические пластиинки и затем тщательно очищенную поверхность серебра обрабатывал парами иода. В результате такой обработки на зеркальной поверхности пластиинки образуется тонкая кристаллическая пленка иодида серебра — вещества, чувствительного к свету.

К 1837 г., после смерти Ньепса, Дагер настолько усовершенствовал методику Ньепса, что мог получать изображения значительно большей яркости.

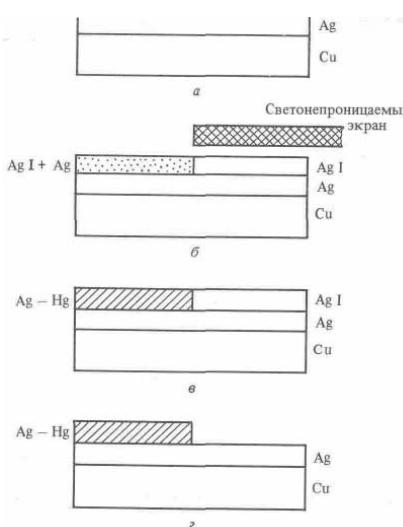
Поскольку новый метод существенно отличался от гелиографии, он назвал его дагерротипией. В этом методе посеребренная и тщательно отполированная медная пластиинка обрабатывалась парами иода, в результате чего на поверхности пластиинки образовывался тонкий слой иодида серебра (рис. 1.4, а). Затем пластиинку экспонировали на свету. На рис. 1.4, б левая половина пластиинки подверглась действию света, в то время как правая половина была закрыта светонепроницаемым экраном.

Пластиинка в фотоаппарате освещается светом, отраженным от снимаемого объекта с множеством градаций светотеней. На тех местах пластиинки, которые подвергаются воздействию света, происходит фотолиз иодида серебра с образованием микроскопических частиц металлического серебра, не видимых глазом. Далее пластиинку проявляют в парах ртути. Частицы серебра взаимодействуют с ртутью с образованием амальгамы серебра, что можно наблюдать визуально.

Амальгама серебра создает участки с матовой поверхностью, оптические свойства которой отличаются от зеркальной поверхности серебра.

<sup>1)</sup> H Davy, Journal of the Royal Institution, 1. 170 (1802)

Рис. 1.4 Схема получения изображения методом дагерротипии а — исходная пластиинка, б — засвеченная пластиинка, в — пластиинка, проявленная в парах ртути, г — фиксированное изображение AgI — иодид серебра, Ag — металлическое серебро, Cu — медь, Ag — Hg — амальгама серебра



(рис. 1.4,в). Неэкспонированный иодид серебра удаляют последующей обработкой пластиинки раствором тиосульфата натрия (рис. 1.4,г). Первоначально для фиксирования изображения использовался хлорид натрия (поваренная соль).

Первые дагерротипы были сделаны с неподвижных объектов (рис. 1.5), так как даже при ярком солнечном свете для получения изображения требовалось 15—30 мин экспозиции.

Впервые этот способ был описан и публично продемонстрирован в 1839 г.

В 1840 г благодаря трем усовершенствованиям процесс стал коммерчески пригодным. В том же году Йозеф Петцваль для фотосъемки портретов разработал многолинзовый объектив (см. рис. 4.40), который по сравнению с ранее используемым простым мениском (одиночной линзой) позволял увеличить яркость изображения на пластинке в 16 раз. Была повышена светочувствительность пластинок путем обработки парами брома или смесью паров брома и хлора. Эти усовершенствования позволили довести время экспозиции до значения меньше 1 мин, что дало возможность применять данный метод для портретной съемки. Обработанная пластинка тонировалась в пурпурно-коричневый тон хлоридом золота. Кроме изменения цвета такой процесс позволил сделать пластинку существенно более долговечной.

Показанные на рис. 1.4 участки пластинки, которые подвергались воздействию света, представляют собой темно-серую серебряную амальгаму, по цвету напоминающую материал, который используется для пломбировки зубов. Участки, которые были в тени, имеют зеркальную поверхность серебра.

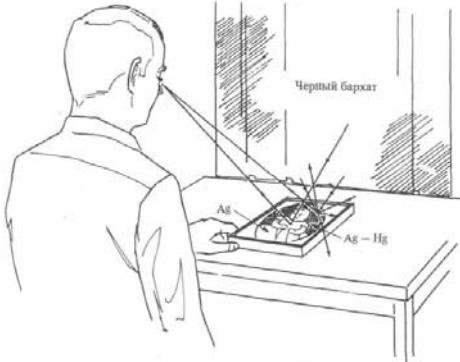


Рис.1.5.

Дагерротипия Королевской часовни, С Бемис, 1840 г (Международный музей фотографии Дж. Истмена)

Рассматриваемый в падающем свете дагерротип обычно имеет обращенное распределение светотени по сравнению с реальным объектом. Однако, если пластинку рассматривать в свете, отраженном под определенным углом от темного материала, такого, как например, бархат, неэкспонированные участки пластинки будут казаться более темными по сравнению с матовой поверхностью амальгамы (рис.

1.6). При этом изображение на поверхности дагерротипа получается перевернутым, как в зеркале. Иногда перед фотоаппаратом помещали зеркало; в этом случае после обработки получался дагерротип, на котором левая и правая части зеркально не перевернуты. В некоторых случаях



дагерротипы тонировали, накладывая краситель кистью или с помощью кашэ.

Рис. 1.6.

Иллюстрация, поясняющая возникновение оптических эффектов при рассматривании Дагерротипа на фоне черного бархата.

Дагерротипы могли отражать мельчайшие подробности объекта и давать прекрасное изображение, но время экспонирования было слишком велико, что являлось их большим недостатком. Другим недостатком дагерротипии было то что для получения нескольких копий необходимо повторное фотографирование, что не всегда представлялось возможным. Однако, несмотря на

несовершенство процесса, число фотографов неуклонно росло. Хотя этот метод и использовался для пейзажных, архитектурных и рекламных съемок, основным применением дагерротипии стал портретный жанр. До развития дагерротипии изображения человека можно было получать только с помощью живописи. Однако живописные работы требовали больших затрат времени и денег. Дагерротипия стала недорогим способом портретной съемки и приобрела широкую популярность в Америке.

#### Негативно-позитивный процесс

После завершения артистической карьеры английский ученый-любитель Уильям Генри Фоке Талбот экспериментировал в фотографии и в результате изобрел фотографический способ размножения копий. Он создал светочувствительную бумагу, которую изготовил путем пропитывания листов бумаги раствором хлорида натрия с последующей (после высушивания) обработкой азотнокислым серебром, что приводило к образованию хлорида серебра. Сенсибилизированная таким способом бумага экспонировалась в небольшой фотокамере до тех пор пока не возникало видимое глазом изображение.

Этот процесс, названный опечатыванием, требовал значительного времени экспозиции, большего чем процесс, включающий стадию проявления. После экспонирования бумага промывалась в растворе хлорида натрия или иодида калия, в результате чего оставшийся хлорид серебра становился нечувствительным к действию света. Те участки, которые подвергались действию света и состояли из мельчайших частиц серебра, были темными. На неосвещенных поверхностях

была видна белая бумага, т. е эти участки были светлого оттенка. Талбот сообщил об этих первых результатах Королевскому обществу в январе 1839 г.

В 1819 г. английский астроном Джон Гершель обнаружил, что тиосульфат натрия растворяет различные соли серебра узнав о работе Пагера и Талбота в январе 1839 г., он сенсибилизировал бумагу солями серебра и после экспонирования фиксировал изображение тиосульфатом натрия. Вначале тиосульфат натрия называли гипосульфитом натрия, откуда и возникло сохранившееся до наших дней английское сокращение «гипо», которое употребляется для обозначения фиксирующих растворов. Хотя первоначально полученные Талботом изображения имели обращенное распределение светотени, позже он обнаружил, что фотокопирование на другую светочувствительную бумагу вновь изменяет распределение светотени.

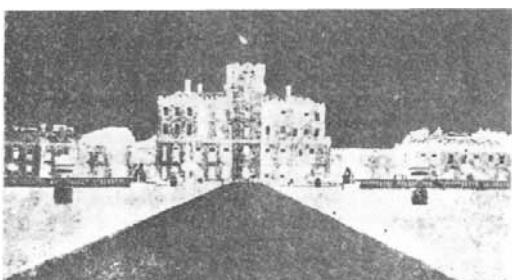


Рис.1.7

Негатив полученный Дикенсом в 1835 г методом калотипии (Международный музей фотографии Дж. Истмена)

Гершель назвал изображение с обращенным распределением светотени *негативом* (рис 1 7), а изображение, тона которого совпадают с тонами снимаемого объекта, — *позитивом* (рис 1 8). В 1840 г Талбот существенно усовершенствовал предложенный метод и назвал полученные изображения *калотипиями*.

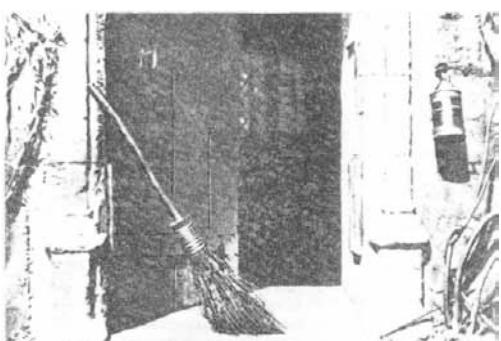


Рис.1.8

«Открытая дверь» — позитив полученный В. Талботом в 1844 г методом калотипии (Международный музей фотографии Дж. Истмена)

Позже, по предложению друзей, он переименовал их в *талботипии*. В усовершенствованном методе он изготавливал бумагу, обрабатывая ее сначала нитратом серебра, а затем иодидом калия, чтобы получить светочувствительную соль — иодид серебра. Затем бумага обрабатывалась смесью галловой кислоты и нитрата серебра. После кратковременного экспонирования в фотокамере негатив проявлялся в том же растворе нитрата серебра с галловой кислотой.

Английский ученый-любитель Джозеф Рид в 1837 г. обнаружил, что галловая кислота влияет на светочувствительность солей серебра. Однако он не осознал, что галловая кислота действует как проявитель. В первых экспериментах Талбота негативы фиксировались бромидом калия, позже — теплым раствором тиосульфата натрия. Для получения позитива использовалась та же бумага, обработанная хлористым серебром, и процесс спечатывания с оригинала-негатива. Так как волокнистая структура бумажной подложки негатива резко ухудшала качество позитива, для увеличения четкости негативные изображения подвергались вощению (пропитывались воском или маслом).

Калотипия никогда не была так популярна, как дагерротипия, что частично объясняется патентами Талбота, ограничивающими ее применение, а также невозможностью с помощью этого метода передавать четкое изображение мелких деталей при портретной фотосъемке по сравнению с дагерротипией. Калотипия наиболее часто использовалась для съемки архитектуры и пейзажей, когда мягкое изображение усиливали, а не снижало зрительное впечатление от изображения.

В 1850 г. Луи Бланкар-Эврар, используя метод Талбота, изобрел новый тип фотобумаги — *альбуминную фотобумагу*, которая использовалась в качестве типовой до конца столетия. Бумагу покрывали яичным белком с растворенными в нем бромидом и иодидом калия. Затем ее сенсибилизировали раствором нитрата серебра. Изображение формировалось в результате длительного экспонирования солнечным светом, проходившим через негатив, тонировалось хлоридом золота, фиксировалось, промывалось и сушилось. Бланкара-Эврара не удовлетворял метод спечатывания из-за длительного времени экспонирования. Он усовершенствовал негативный процесс в калотипии Талбота и использовал фотобумаги, не требующие проявления. После экспонирования всего лишь в течение нескольких секунд скрытое изображение становилось видимым, приобретая оливково-зеленый цвет, который постепенно переходил в серый при использовании кислого фиксажа. К 1852 г. Бланкар-Эврар основал вблизи Лилля во Франции большую коммерческую фирму по изготовлению фотоотпечатков с помощью этого метода. К 1857 г. фирмой были изготовлены по меньшей мере 100 000 фотоотпечатков. Несмотря на то, что их качество было прекрасным, этот метод не стал общепринятым и к концу XIX века почти

полностью вышел из употребления.

#### Стеклянные негативы

Получаемый в калотипии негатив, даже пропитанный маслом, не дает резкого изображения, так как бумажная основа рассеивает свет в процессе фотопечати. Для предотвращения этого необходимо использовать прозрачную основу, на которую нанесены светочувствительные соли серебра. В 1847 г. Клод Ньепс, родственник Нисефора Ньепса, изобрел альбуминную фотопластинку (стеклянная пластина, покрытая яичным белком, содержащим иодид калия). Как и при альбуминной печати, фотопластинка сенсибилизировалась раствором нитрата серебра. После экспонирования в фотокамере пластина проявлялась в галловой кислоте, фиксировалась и промывалась. Получаемые негативы были пригодны для изготовления фотоотпечатков, четко передающих мелкие детали. Однако для образования скрытого изображения на пластинке требовалось время экспонирования 5—15 мин. Именно поэтому (и особенно для портретных фотосъемок) требовались более чувствительные фотопластинки.

В 1851 г. англичанин Фредерик Скотт Арчер разработал *мокрую коллоидионную пластиинку*, которая сразу стала лучшим материалом для негативов. Коллодий представляет собой вязкий раствор нитроцеллюлозы в смеси эфира и спирта. Пластиинки Арчера изготавливались путем растворения соответствующих иодидов и бромидов в вязком коллодии и нанесения этого раствора на стеклянную пластиинку. Невысохшую пластиинку сенсибилизировали погружением в раствор нитрата серебра, экспонировали в фотокамере, проявляли, фиксировали, промывали и сушили. Такие мокрые фотопластинки оказались весьма чувствительными к свету и давали высокую четкость изображения. Существенным недостатком этого метода являлась необходимость осуществления всего процесса за время, пока покрытие не успевало полностью высохнуть — так как, подсохнув, оно становилось практически непроницаемым для обрабатывающих растворов. Вследствие того, что негативы изготавливались на основе стеклянных пластиинок, они были тяжелыми и хрупкими.

Хотя мокрые коллоидионные пластиинки предназначались для получения негативов, с которых можно было получать позитивные отпечатки, Арчер заметил, что если рассматривать негатив на фоне темной поверхности, то получающееся изображение выглядело как слабоконтрастный позитив: светлые участки становились черными, а темные — серыми. В 1854 г. А. Катинг запатентовал этот процесс в Америке, а М. Рут назвал эти прямые позитивы *амбротипиями* или коллоидионными позитивами (рис. 1.9). Гамильтон Смит в 1856 г. запатентовал свой метод, который впоследствии стал известен как тинтайп<sup>1</sup>). В этой модификации прямого позитива Арчера эмульсия наносилась на черную или коричневую эмалированную поверхность металлической пластиинки. Французский ученый Адольф Мартин впервые сообщил об этом методе в 1853 г. Фотографии на подложке из металла были известны как *мелианотипии* и *ферротипии*.

В 1854 г. французский исследователь Дисдери запатентовал метод *carte-de-visite* (визитные фотокарточки). В этом методе с помощью многолинзовой фотокамеры (рис. 1.10) при экспонировании мокрой коллоидионной пластиинки получалось одновременно несколько изображений одного и того же предмета. В других вариантах фотопластинка перемещалась в фотокамере так, что можно было получить на одной пластиинке несколько изображений.

Тинтайп — разновидность способа дагерротипии — *Прим. перев.*

#### Рис. 1.9.

«Охотник графства Роэн» — амбротипия, полученная Ф. Мешэком около 1860 г (библиотека Университета Сев Каролины, Чэпел Хилл)

Негативы, полученные методом *carte-de-visite*, применялись для получения альбуминных фотоотпечатков (рис. 1.11), которые разрезались на отдельные части и могли использоваться как визитные карточки с напечатанным портретом.

Тинтайп, коллоидионный позитив и *carte-de-visite* как методы недорогой портретной фотосъемки заменили дагерротипию. Коллоидионные мокрые пластиинки заменили калотипию и дагерротипию в ответственных случаях съемки. Коллоидионный мокрый процесс сделал фотографию доступной для состоятельных любителей и профессиональных фотографов. Этот способ значительно расширил горизонты фотографии и использовался для художественного отображения различных исторических фактов.



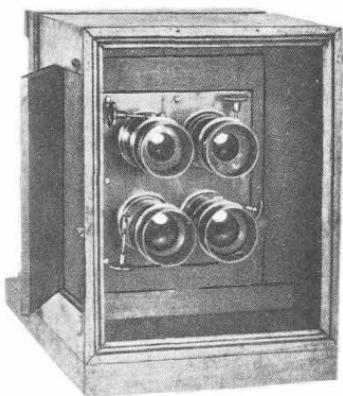


Рис. 1.10.

Четырехобъективная фотокамера для получения четырех изображений на одной пластинке (Международный музей фотографии Дж. Истмена)

#### Негативы с сухим покрытием

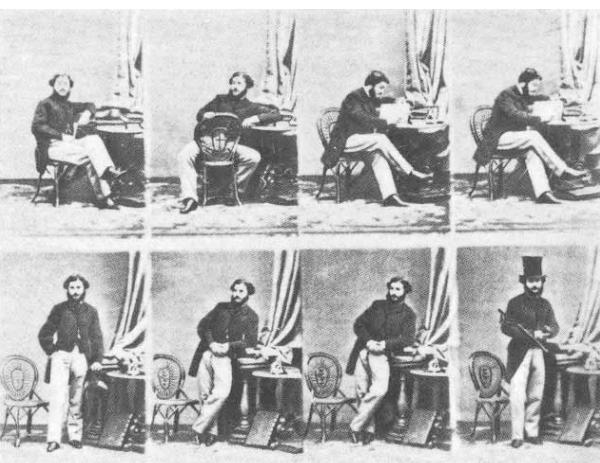
Хотя мокрый коллодионный метод был явным шагом вперед, фотограф должен был сам готовить пластиинки и использовать их влажными. Б.Саус и В.Болтон в 1864 г изобрели сухую коллодионную пластинку, ставшую в 1867 г коммерчески доступной. На пластиинки наносился колладий, содержащий бромиды аммония и кадмия, а также азотнокислое серебро.

Рис. 1.11.

Неразрезанный фотопозитив визитных карточек (Международный музей фотографии Дж. Истмена)

Для них не требовалась дополнительная стадия сенсибилизирования, как в мокром коллодионном процессе, их можно было изготавливать заранее. В фотокамере пластиинки экспонировались сухими и подвергались обработке в удобное для фотографа время. Однако для этого метода требовалось приблизительно в три раза большее время экспонирования, чем в случае мокрой коллодионной пластиинки.

Английский врач Р. Л. Мэддокс в 1871 г сообщил в журнале *British Journal of Photography* о пластиинке, аналогичной пластиинке Сауса и Болтона. Основным ее отличием было то, что в качестве диспергирующей среды вместо



колладия использовалась желатина. Растворенная в воде желатина смешивалась с бромидом калия, а затем с нитратом серебра. На стеклянную пластиинку наносилась полученная эмульсия и высушивалась. После дальнейшего усовершенствования в 1878 г Ч Беннетом эти пластиинки, названные *сухими желатиновыми пластиинками*, успешно использовались для экспонирования за время порядка 0,1с. К тому же фотографы были избавлены от необходимости использовать штатив и собственноручно изготавливать фотопластиинки.

#### Гибкая фотопленка и портативная фотокамера

Хотя пластиинки с сухой желатиновой эмульсией допускали применение коротких выдержек, размеры стеклянных пластиинок и их хрупкость не позволяли сделать фотокамеру портативной. В 1888 г. Д. Карбут из Филадельфии изготовил пленку с прозрачной гибкой подложкой путем нанесения желатиновой эмульсии на тонкие целлULOидные полосы. Такая подложка была значительно более легкая и менее хрупкая, чем стеклянные пластиинки, но слишком толстая, чтобы быть гибкой. Требовались достаточно гибкая подложка и роликовый держатель для пленки (*кассета*). Такую кассету еще в 1854 г. предложил англичанин А. Мэлвиш.

В 1884 г. Джордж Истмен получил патент на новую систему фотографирования, в которой использовались роликовая фотопленка на бумажной подложке и кассета, разработанная Д. Истменом и В. Уолкером. Кассета заряжалась пленкой в темном помещении и прикреплялась к фотоаппарату, сконструированному для съемки на фотопластиинки, в виде дополнительной приставки. В 1888 г. Истмен запатентовал портативную фотокамеру, в которую помещалась кассета с роликовой фотопленкой. Вначале использовалась пленка на бумажной подложке с отделяемым фотослоем. Фотокамера заправлялась в темноте роликом пленки на 100 кадров изготовителем или поставщиком. После того как пленка была отснята, фотокамера возвращалась изготовителю или поставщику, который извлекал старый и заправлял в фотокамеру новый ролик пленки. После обработки эмульсия с трудом отделялась от бумажной основы, закреплялась и использовалась для получения позитивных фотоотпечатков.

В 1887 г. Г. Гудвин из Ньюарка (шт. Нью-Джерси) подал заявку на патент на способ изготовления прозрачной гибкой пленки. Подложка изготавлялась поливом раствора нитрата целллюлозы на гладкой поверхности (например, на стекле). После того, как нитрат целллюлозы затвердевал, его можно было использовать в качестве прозрачной гибкой подложки для фотографической эмульсии. В 1889 г. компания «Истмен кодак» наладила производство прозрачной гибкой пленки с подложкой также из нитрата целллюлозы. Эта пленка была разработана Д. Истменом и Г.

Рейхенбеком и изготавлялась почти таким же способом, как в патенте Гудвина. В 1895 г. С. Торнер усовершенствовал метод роликовой пленки настолько, что фотокамеру можно было заряжать пленкой на свету. К этому времени фототехника существенно упростилась и стала недорогой, что сделало фотографирование доступным для любителей.

#### **Усовершенствование желатиновой эмульсии**

Соли серебра чувствительны только к синей и фиолетовой областям спектра. В 1873 г. Г. Фогель обнаружил, что при обрабатывании фотоэмульсии соответствующими красителями, называемыми *оптическими сенсибилизаторами*, фотопластинки становились чувствительными и к другим областям видимого спектра, за исключением длинноволнового красного излучения. Первые оптически сенсибилизированные коммерческие пластинки, имевшие, однако, не вполне удовлетворительное качество, начали изготавливать в 1875 г. во Франции.

В 1883 г. австрийский химик Д. Эдер открыл оптический сенсибилизатор для зеленой области спектра — эритрозин, существенно превосходивший все известные в то время красители, используемые для этой цели. Пластинки с оптическими сенсибилизаторами, названные *ортокроматическими*, стала выпускать в 1884 г. в Вене фирма «Лоури и Пленер». Это название используется в настоящее время для фотоматериалов, светочувствительных ко всему видимому спектру, за исключением красной области. В 1905 г. австрийский химик Б. Гомолка, работавший в Германии, открыл красный сенсибилизирующий краситель — пинационол. В 1906 г. Рэттен и Вейнрайт в Англии использовали этот краситель совместно с усовершенствованным зеленым сенсибилизатором для изготовления пластинок, названных *панхроматическими*. Этот термин используется теперь для фотоматериалов, чувствительных ко всем областям видимого спектра.

Одно из первых систематических научных исследований фотографического процесса было начато в 1876 г. в Англии В. Дриффильдом и Ф. Хартером. Они изучали соотношение между образующимся в проявленной пленке количеством серебра и временем ее экспонирования. Результаты этих экспериментов были опубликованы в 1890 г. Эта область исследований называется *сенситометрией* (гл. 8), а кривая, описывающая зависимость между *оптической плотностью* *почернения* пленки и логарифмом экспозиции, — *характеристической кривой Хартера и Дриффильда* в честь первооткрывателей. В 1923 г. английский исследователь С. Шеппард обратил внимание на то, что небольшие количества примесей органических соединений серы, присутствующих в желатине, значительно увеличивают светочувствительность фотопленки.

#### **История создания фотобумаги**

Хотя Бланкар-Эврар изобрел и применил непроявляемую альбуминную фотобумагу еще в 1850 г., она использовалась в качестве типовой до конца XIX века. Громоздкий *фотоувеличитель*, названный солнечной камерой, был изобретен в 1857 г. американцем Д. Вудвордом. С появлением дуговых ламп фотопечатание можно было выполнять в темной комнате, но оставалась нерешенной проблема прочности фотобумаги. В 1874 г. П. Маудслей в Англии сообщил о создании желатиновой фотобумаги, содержащей бромид серебра, и в 1879 г. Дж. Сван организовал промышленное производство этой фотобумаги. Желатина стала основой всех фотобумаг с проявлением, которые заменили альбуминную фотобумагу, и до сих пор используется в промышленном производстве.

К этому времени был разработан и использовался ряд управляемых процессов<sup>1,^</sup> при изготовлении фотоотпечатков. Свое название они получили потому, что человек, занимающийся фотопечатанием, мог корректировать градации тонов, контрастность и тональность отпечатков. Эти процессы в некоторой степени зависят от действия раствора *бихромата* на *гуммиарабик* или желатину. Желатина или гуммиарабик, обработанные бихроматом, затвердевают под воздействием света. После экспонирования через негатив незатвердевшая желатина или гуммиарабик, обработанные бихроматом, растворялись в воде. Полученное таким образом рельефное изображение покрывали краской и использовали в качестве клише для изготовления отпечатков. В 1855 г. А. Паутевен на основе этого принципа изобрел масляный процесс. В 1864 г. Д. Сван усовершенствовал этот процесс и в качестве красителя использовал сажу. Этот процесс был назван *карбопроцессом*. В случае использования других красителей его называли *гумми-бихроматным процессом*. Т. Мэнли в 1905 г. разработал основы *карборо-процесса*<sup>2)</sup> а Э. Фармер в 1919 г. незначительно модифицировал его<sup>3)</sup>. Э. Уолл в 1907 г. изобрел *бромомасляный процесс*, основой которого является затвердевание хромовокислого желатинового слоя при соединении с серебром во время бромной печати. Фотографы использовали много разных модификаций этих бихроматных процессов. Гумми-бихроматный (включая карбопроцесс), карборо- и бромомасляный процессы используются и сегодня.

Хотя обсуждение фотомеханических методов изготовления копий фотографий в этой книге не проводится, упомянем по крайней мере один процесс — *вудбюритипо*, изобретенную В. Вудбюри в 1864 г. В этом процессе бихроматный желатиновый позитив, полученный воздействием прошедшего негатива света на желатину, запрессовывают в свинцовую пластинку, на которой образуется рельефное изображение. Пластинка с рельефным изображением затем покрывается окрашенной желатиной, которая после переноса на бумагу высыхает. Таким способом могли быть сделаны копии, передающие все оттенки оригинала. Хотя этот процесс гораздо сложнее, чем современная полутоновая техника, дающая серую шкалу (шакалу серых оттенков), качество вудбюритипии остается непревзойденным.

Kraszna-Krausz A., Chairman, Ed. Board, The Focal Encyclopedia of Photography, Desk Edition, London: Focal Press, 1969, p. 348.  
Этот фотографический способ вначале получил название «озобром». В основе метода лежит явление задубливания желатины, содержащей хромовокислую соль. При контактной печати на бромосеребряножелатинную бумагу с пигментной бумагой, обработанной в «озобромном» растворе, пигментный слой оказывается избирательно задубленным (пигментная копия). — *Прим. перев.*

Фармер опубликовал несколько отличный рецепт очищающего раствора для пигментного слоя, заменив лимонную кислоту смесью соляной и уксусной, а хромовые квасцы — формалином. — *Прим. перев.*

В. Уиллис создал процесс платиновой печати, который был запатентован в 1873 г. как *платинотипия*. В этом способе для изготовления фотоотпечатков на бумаге использовалась светочувствительность определенных солей железа, смешанных с солями платины. Вместо серебра темные участки на фотоснимке создавались платиной, и они, следовательно, были более стабильными, чем в случае серебра. Во время первой мировой войны из-за нехватки платины был развит аналогичный способ печати с использованием палладия. *Палладиотипия* и *платинотипия* вышли из употребления в основном вследствие высокой стоимости основных фотоматериалов, используемых в этих процессах.

### **Портативная фотография**

Миниатюрные фотокамеры использовались существенно раньше упомянутой выше портативной камеры Истмена (иногда называемой моментальной). Первые фотографии, полученные У. Г. Ф. Талботом, были сделаны на фотопластинках площадью 6,45 см<sup>2</sup>. Однако его камеру нельзя назвать моментальной, так как требовалось длительное время экспозиции. В 1858 г. Т. Скайф сконструировал миниатюрную камеру, имеющую значительную светосилу, которую уже можно считать портативной<sup>1)</sup>.

В 1892 г. Ж. Карпентье сконструировал прецизионную двухобъективную фотокамеру, которую он назвал фотобиноклем, так как она напоминала пару бинокуляров (бинокль). Один объектив использовался для контроля изображения, а второй — для фотографирования. В этой камере применялись сухие фотопластинки размером 5,7×3,8 см и пружинный затвор с временем срабатывания 1/60 с. Один из первых затворов, используемых в фотокамере, сконструирован Э. Майбриджем в 1869 г. Этот затвор использовался Э. Майбриджем для фотографирования скачущих лошадей; при этом требовалось, чтобы затвор срабатывал быстрее, чем за 1/1000 с. Фотобинокль Карпентье многократно воспроизводился и усовершенствовался. В 1899 г. Г. Сигристе создал однообъективную камеру подобного типа с внешним видоискателем и шторным затвором с временем экспозиции до 1/2500 с.

В 1914 г. в Германии О. Варнак создал малоформатную фотокамеру, которая революционизировала всю фотографию. С 1924 г. фирма Leitz Company начала выпускать эту камеру под названием Leica. В скором времени к этой камере были разработаны сменные объективы с различным фокусным расстоянием. В 1932 г. акционерное общество Ikon Zeiss AG выпустило в продажу аналогичную камеру, названную Contax. Она имела встроенный видоискатель, совмещенный с фокусирующим механизмом.

<sup>1)</sup> Еще в 1847 г русский фотограф Левицкий внес принципиальное изменение в конструкцию фотоаппарата, снабдив его мехом, что позволило значительно уменьшить его габариты. Этот тип фотоаппарата с небольшим усовершенствованием сохранился и в современной фотографии. В СССР он выпускается под названием «фотографическая камера» (ФК) и используется главным образом в павильонных съемках. — *Прим. перев.*

Этот тип камер известен как *фотоаппараты с дальномером* (гл. 2). Они дают кадр размером 24×36 мм на роликовой пленке шириной 35 мм.

Несмотря на то, что 35-мм фотокамеры были очень удобны в обращении, по разрешающей способности деталей получаемого изображения они не могли соперничать с крупноформатными камерами. Среднеформатные фотокамеры, в которых применяется пленка шириной 60 мм, также являются портативными, но обеспечивают повышенное качество воспроизведения деталей по сравнению с 35-мм камерами. В 1929 г. Франк и Гейдек разработали зеркальный фотоаппарат с двумя объективами под названием Rolleiflex, в котором применена 60-мм пленка. Такого типа фотокамеры (гл. 2) дают изображение площадью 36 см<sup>2</sup>. Один из двух идентичных объективов

камеры применяется для рассматривания объекта съемки на матовом стекле с помощью зеркала, а другой — для фотографирования. В современных фотокамерах широко используется 60-мм пленка, позволяющая получать квадратные или прямоугольные кадры среднего формата.

В настоящее время наиболее распространенным среди фотографов-профессионалов является 35-мм *однообъективный зеркальный фотоаппарат* (гл. 2). В прежние времена использовались крупноформатные камеры этого типа, например камера Graflex (1900 г.). Первая 35-мм зеркальная однообъективная фотокамера для коммерческих целей Kine Exakta Model One была выпущена в Германии в 1936 г. При съемке эта камера располагается на уровне пояса, как и зеркальный фотоаппарат с двумя объективами, поскольку изображение объекта отражается зеркалом на горизонтальное матовое стекло и рассматривается фотографом сверху. В 1949 г. фирма Zeiss выпустила 35-мм фотокамеру Contax S, которая имела пентапризму, расположенную над матовым стеклом так, что фотографировать нужно было на уровне глаз.

Все эти типы фотокамер были сконструированы для съемки при дневном свете, и хотя их объективы имели значительную светосилу, они не могли использоваться при низком уровне освещенности. В 1859 г. Р. Бунзен в Германии и Г. Роско в Англии сообщили о возможности получить значительную освещенность при горении магния и предложили этот способ в качестве возможного источника света для фотосъемки. К 1864 г. Э. Сонштадт выпустил магниевую проволоку, горение которой использовалось в фотографии для освещения. Несмотря на то, что время экспонирования было еще около 1 мин, горящую магниевую проволоку можно рассматривать как первый переносной источник света в фотографии. Однако в процессе горения магния возникало плотное облако белого дыма, которое усложняло фотографирование.

Г. Кеньон в 1883 г. предложил воспламеняемую смесь порошкообразного магния и хлорида калия, при горении которой возникает очень яркий свет в течение короткого промежутка времени. Усовершенствованная смесь, содержащая эти материалы, использовалась как переносной источник освещения и известна как магниевая вспышка. Однако дым по-прежнему оставался проблемой при фотосъемке.

В 1925 г. П. Виркоттер запатентовал первую *лампу-вспышку*. Порошок магния помещался в стеклянный баллон, содержащий воздух или кислород при низком давлении. Магний воспламенялся при прохождении электрического тока через проволоку, покрытую магнием. В 1929 г. И. Остермайер усовершенствовал лампу-вспышку, заменив магний порошком алюминия. Эта лампа-вспышка промышленно производилась в 1930-х годах. Будучи удобным портативным переносным источником света, она нашла широкое применение. Первые *электронные фотовспышки* были разработаны Г. Эджертоном в 1931 г. и сегодня полностью заменили одноразовую лампу-вспышку во многих случаях съемки.

### **Упражнения**

1. Опишите, как можно использовать асфальт для изготовления копии карандашного эскиза. Покажите, как этим способом получить позитивный отпечаток.
2. Каковы основные преимущества и недостатки дагерротипии по сравнению с гелиографией?
3. Расскажите о преимуществах и недостатках калотипии по сравнению с дагерротипией.
4. Почему колloidионные мокрые пластинки и методы, основанные на их применении, заменили дагерротипию и калотипию?
5. Какова история создания фотобумаги? Объясните, почему процесс «спечатывания» использовался в течение длительного времени после того, как уже была создана проявляемая фотобумага.
6. Почему сухие желатиновые пластинки заменили колloidионные мокрые пластинки? Почему нельзя использовать колloidионные сухие пластинки?
7. Расскажите о создании гибких фотопленок.
8. Какова роль серы и органических красителей в современных монохромных (черно-белых) фотографических эмульсиях?
9. Каковы основные форматы (размеры кадра) в современных портативных фотокамерах? Какие форматы используются профессиональными фотографами? Почему?
10. Расскажите о развитии импульсного освещения.

## Глава 2. Получение изображения

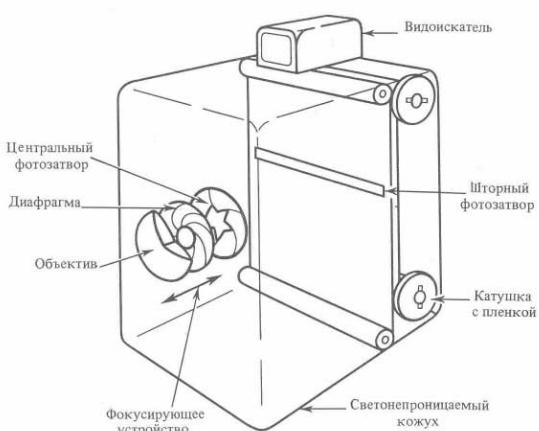
В этой главе рассмотрены различные типы фотокамер, устройство их узлов, а также способы определения экспозиции при съемке

### Фотокамера

Для получения изображения на пленке используются различные *галогениды серебра* (бромид, хлорид и иодид). Так как эти соединения светочувствительны, пленка помещается в светонепроницаемую камеру, в которой происходит экспонирование светом, прошедшим сквозь объектив в течение определенного времени. Такое устройство называется фотокамерой (рис. 2.1). В ней пленка располагается в строго определенном положении. В небольших фотокамерах обычно используется роликовая фотопленка, а в больших — форматная пленка в виде отдельных листов. Фотокамеры с роликовой пленкой снабжены механизмом покадрового передвижения пленки с одной катушки на другую. Это перемоточное устройство может соединяться с механизмом, который взводит *затвор* объектива при каждом переводе пленки на один кадр.

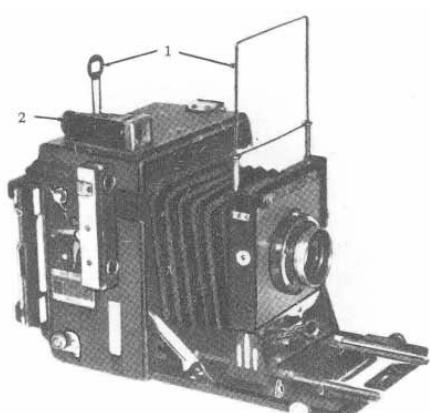
Во всех фотокамерах, кроме самых примитивных типа камеры-обскуры, для повышения яркости изображения применяется линза или многолинзовый объектив (рис. 2.1); в простых фотокамерах этот объектив закреплен постоянно в определенном положении относительно плоскости пленки. Однако с помощью такого неподвижного объектива нельзя получить резкого изображения предметов, расположенных на разных расстояниях от аппарата, если не менять расстояния между объективом и пленкой. В более сложных фотокамерах положение объектива изменяется относительно плоскости пленки, что позволяет сфокусировать объектив на выбранный объект (рис. 2.1). Механизм, изменяющий положение объектива, снабжается шкалой, маркированной в метрах или футах и указывающей, на какое расстояние сфокусирован объектив. Фотокамера снабжена *видоискателем* (визиром), с помощью которого фотограф может выбрать объект фотографирования и расположить его в кадре. В качестве видоискателя используется визирная рамка или простое телескопическое устройство, ограничивающее поле зрения вне зависимости от фокусировки объектива камеры (рис. 2.2). Во многих современных камерах видоискатель является составной частью *дальномера* и, следовательно, позволяет контролировать фокусировку объектива.

**Рис. 2.1.**  
Принципиальное устройство фотокамеры



Во многих первых камерах фотопленка экспонировалась путем снятия крышки с объектива, а по окончании экспонирования помещением крышки на место. В современных фотокамерах для регулирования продолжительности экспозиции используется затвор. Время, на которое открывается затвор, устанавливается с таким расчетом,

чтобы обеспечить оптимальные условия экспонирования с учетом различной освещенности объекта съемки и различной светочувствительности используемых фотопленок. Затвор обычно располагается между линзами объектива или непосредственно перед пленкой (рис. 2.1). К первому типу затворов относится *центральный* или *лепестковый* (рис. 2.3), а ко второму — *шторный* (рис. 2.4). Кроме того, большинство фотокамер снабжено устройством, позволяющим изменять освещенность пленки в кадровом окне. Это устройство называется *диафрагмой* или *ирисовой диафрагмой* (рис. 2.1); оно изменяет действующее отверстие объектива и напоминает радужную оболочку глаза (рис. 2.5).



**Рис. 2.2.**

Два типа видоискателей — визирная рамка (1) и телескопический видоискатель (2)/Эрл Н Митчел (ЭНМ), 1983 г]

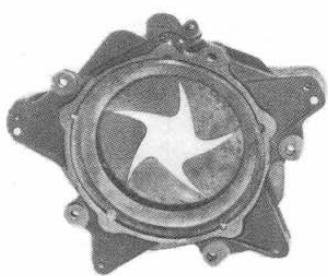


Рис. 2.3.

Общий вид центрального фотозатвора, используемого в фотоаппарате для аэросъемки (ЭНМ 1983 г.)

В некоторых устаревших камерах и в камерах с объективами, имеющими очень короткое фокусное расстояние, между объективом и пленкой помещают металлическую «сетку» с отверстиями различного диаметра. Действующее отверстие объектива можно регулировать посредством пластинки с отверстиями различного диаметра, которая выдвигается за линзой. Такая диафрагма называется *вставной*.

Многие современные мало и среднеформатные фотокамеры снабжены

встроеннымными *фотоэкспонометрами*, позволяющими устанавливать оптимальную экспозицию. Эти экспонометры могут функционировать как в ручном режиме определения экспозиции, так и автоматически управлять экспозицией путем регулирования *апертуры* (действующего отверстия объектива) или *выдержки* (скорости срабатывания затвора). Все современные фотокамеры снабжены синхроконтактом для подключения фотовспышки одноразового действия или электронной импульсной лампы. Кроме того, фотокамеры (в первую очередь малоформатные) снабжены *автоспуском* — устройством, обеспечивающим срабатывание затвора после некоторого времени задержки<sup>1)</sup>.

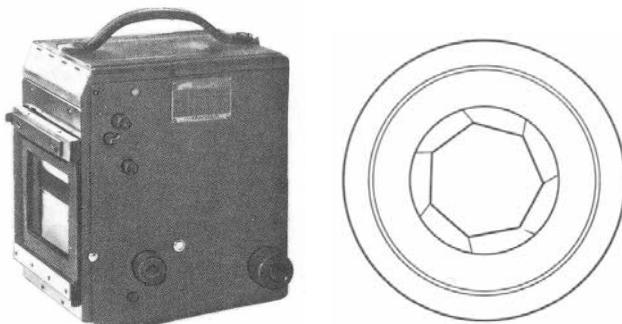


Рис. 2.4.

Шторный затвор в фотокамере Revolving Back Grafex (слева)

Рис. 2.5.

Ирисовая диафрагма (справа)

Во многих современных фотокамерах используются различные усовершенствования, такие, как виндеры (автоматический взвод затвора), автоматическое управление вспышкой, возможность использования сменной оптики,

заменяемая задняя стенка камеры и поворотные турели<sup>2)</sup>. Эти усовершенствования будут обсуждаться в соответствующих разделах книги.

### Типы фотокамер

Здесь можно ограничиться обзором фотокамер, имеющих регулируемые диафрагму, затвор и объектив. Фотокамеры могут быть классифицированы по размерам используемых в них фотопленок. В малоформатных фотокамерах используются фотопленки шириной 35 мм и меньше, в среднеформатных — свыше 35 мм, но не более 70 мм и в крупноформатных — свыше 70 мм.

Наиболее популярной фотокамерой, в которой используется 35-мм пленка и которая удовлетворяет всем требованиям, изложенным в предыдущем параграфе, является однообъективный зеркальный фотоаппарат. Фотоаппараты этого типа, например Asahi Pentax MX (рис. 2.6), сконструированы так, что позволяют фокусировать и определять границы снимаемого кадра непосредственно через съемочный объектив (рис. 2.7). Свет от объекта проходит через объектив и отражается зеркалом на матовое стекло, где возникает изображение, идентичное изображению, которое появилось бы на пленке в отсутствие зеркала.

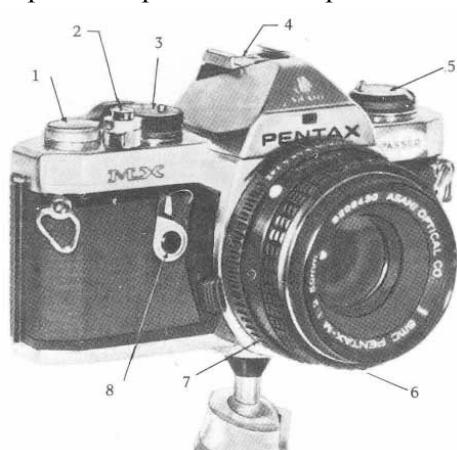


Рис. 2.6.

Однообъективный зеркальный фотоаппарат Asahi Pentax MX (ЭНМ, 1983 г.). 1 — механизм взвода затвора, 2 — спусковая кнопка, 3 — головка установки выдержек затвора, 4 — синхроконтакт, 5 — головка обратной перемотки пленки, 6 — кольцо наводки на резкость, 7 — кольцо установки диафрагмы, 8 — кнопка автоспуска. — *Прим. перев*

1) Обычно время задержки составляет 10—15 с и может быть как постоянным, так и регулируемым — *Прим. перев*

2) Поворотный круглый диск, установленный на фотоаппарате, который снабжен несколькими (обычно тремя) объективами с различным фокусным расстоянием, и позволяющий простым поворотом устанавливать в съемочное положение тот или иной объектив.

Сочетание только зеркала и объектива (без пентапризмы) создает в поле зрения окуляра изображение, которое получается прямым, но зеркально обращенным, если смотреть на матовое стекло сверху. Пентапризма и окуляр обеспечивают прямое и зеркально не перевернутое изображение. Изображение, наблюдаемое с помощью такого видоискателя, будет идентично наблюдаемому при непосредственном рассматривании объекта съемки. Оптика обычного видоискателя формирует изображение сюжета, как если бы он находился на расстоянии около 180 см перед фотоаппаратом.

*Дальнозоркие* люди обычно могут наводить объектив на резкость без использования очков; к несчастью, однако, они плохо различают деления на шкалах объектива.

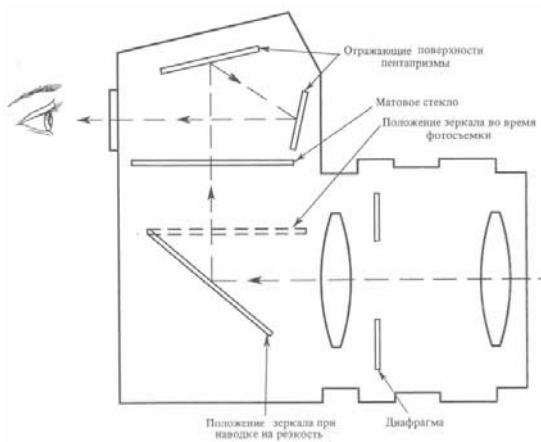


Рис. 2.7.

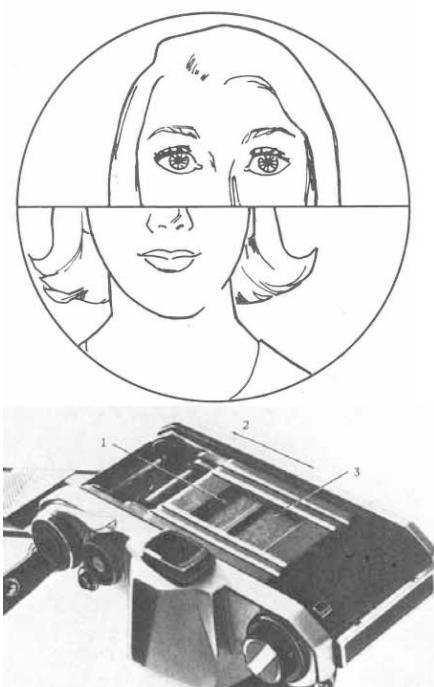
Принципиальная схема фокусировки в однообъективном зеркальном фотоаппарате.

*Близоруким* людям необходимо использовать очки при наводке на резкость. При установке на фотоаппарате основного объектива изображение объектов в видоискателе наблюдается под тем же углом, что и при обычном визуальном восприятии. Обычно центральный участок матового стекла устроен таким образом, чтобы облегчить операцию фокусировки. Для этого используют *бипризму* (клиновое устройство) или множество мельчайших бипризм (*микрорастр*) (гл. 5), которые искажают изображение при неточной наводке объектива.

Рис. 2.8.

Смещение несфокусированного изображения клиновым устройством.

Бипризма смещает часть изображения по отношению к другой его части, если объект «не в фокусе» (рис. 2.8). Если используется микрорастр, то не сфокусированное изображение дробится на много сдвинутых участков, и фотограф видит мерцание. Наводка объектива на резкость осуществляется путем его перемещения вдоль оптической оси при вращении кольца на оправе (рис. 2.6). Расстояние до объекта для фокусирования может определяться и по шкале, имеющейся на объективах. Во многих однообъективных зеркальных камерах видимое поле изображения в видоискателе немного меньше, чем изображение, получаемое на пленке.



Ирисовая диафрагма вмонтирована в объектив (рис. 2.7). Отверстие диафрагмы регулируется поворотом кольца на оправе объектива, маркированного знаменателями относительных отверстий ( $f$ -числами, или диафрагменными числами), показывающими открытие отверстия диафрагмы при фотографировании (рис. 2.6).

Рис. 2.9.

Вид матерчатых шторок затвора однообъективного зеркального фотоаппарата Затвор частично взведен, чтобы были видны обе шторки (ЭНМ, 1983 г.) 1 — первая шторка, 2 — направление перемещения шторок при взводе затвора, 3 — вторая шторка

Многие 35-мм однообъективные зеркальные фотокамеры сконструированы так, что до фотографирования диафрагма полностью открывается и закрывается до выбранной апертуры при срабатывании затвора<sup>1)</sup>. Повышенная яркость изображения при полностью открытой диафрагме облегчает наводку объектива на резкость. Во многих камерах, прежде чем сделать снимок, можно закрыть диафрагму до выбранного значения для того, чтобы проверить глубину резкости изображения, которая будет передана на пленке при фотографировании. Возможность такой установки диафрагмы имеет существенное значение для профессиональных фотографов, поскольку при уменьшении апертуры увеличивается глубина резко изображаемого пространства. В большинстве малоформатных однообъективных зеркальных фотокамер применяется шторный затвор, расположенный непосредственно перед пленкой. Наиболее распространенный затвор состоит из двух матерчатых шторок, двигающихся горизонтально (рис. 2.9). При взводе затвора

первая шторка протягивается перед пленкой, а вторая шторка наматывается на ось сбоку от кадровой рамки. Одновременно с приведением в действие механизма взвода затвора пленка продвигается на один кадр и срабатывает счетчик кадров. При спуске затвора освобождается первая шторка, которая протягивается влево пружиной<sup>2)</sup> (рис. 2.9) и наматывается на другую ось. После заданного промежутка времени, определяемого установкой выдержки затвора, освобождается вторая шторка, которая закрывает кадровое окно с пленкой. Время движения каждой шторки составляет около 1/60 с. Для выдержек, меньших 1/60 с, вторая шторка освобождается до того, как первая полностью откроет кадровое окно.

1) Так называемая «прыгающая» диафрагма — *Прим. Перев.*<sup>2)</sup> Влево, если смотреть со стороны открытой крышки фотоаппарата на рис 29 — *Прим. Перев.*

Следовательно, независимо от длительности экспозиции любой части кадра для полного экспонирования всего кадра необходимо время не менее 1/60 с<sup>1)</sup>. В результате может возникать искажение изображения быстroredвижущихся объектов и существуют ограничения на применение с шторным типом затвора импульсных ламп. Длительность экспозиции задается механически посредством пружины или с помощью электронного устройства.

Во многих камерах такого типа механизм спуска затвора вызывает закрытие диафрагмы до заранее установленного значения относительного отверстия и поднимает зеркало, открывая путь свету, проходящему через объектив к пленке. В большинстве однообъективных зеркальных камер после окончания экспонирования зеркало возвращается в исходную позицию и диафрагма снова открывается<sup>2)</sup>. Для того чтобы уменьшить вибрацию от поднимаемого зеркала, некоторые однообъективные зеркальные камеры сконструированы так, что зеркало фиксируется в верхнем положении до открытия затвора.

Некоторые шторные затворы в однообъективных зеркальных камерах двигаются вертикально. Обычно они изготавливаются из двух наборов перекрывающихся металлических пластин (ламелей), которые выглядят и действуют подобно складному вееру и расположены сверху и снизу кадровой рамки. Наборы действуют аналогично первой и второй шторкам. Они перемещаются не строго вертикально, а по дуге большого радиуса. Вследствие более короткого расстояния вертикального перемещения (около 24 мм по сравнению с 36 мм) и особенностей конструкции время открытия и закрытия этого типа затвора в два раза меньше, чем у обычного шторного затвора. Следовательно, для полного открытия кадра с помощью такого затвора требуется не менее 1/125 с.

Одним из преимуществ однообъективной зеркальной камеры является легкость, с которой различные типы объективов могут устанавливаться на ней. Объективы обычно крепятся к корпусу штыковым (байонетным) или резьбовым способом и могут быть заменены без использования дополнительных приспособлений. Так как объектив используется одновременно как видоискатель и как дальномер, не требуются другие устройства для определения границ кадра и наводки на резкость при смене объектива. Конструкция шторного затвора предотвращает засвечивание пленки, поэтому можно удалять объектив, даже если камера заряжена. Если в однообъективной зеркальной камере установлен центральный затвор, то устройства, которые позволяют производить смену объективов и наводку на резкость через объектив, очень сложны. Кроме того, в каждый объектив встроен свой затвор, повышающий стоимость объектива.

') У большинства отечественных фотоаппаратов это время составляет 1/30 с. — *Прим. ред.*<sup>2)</sup> Так называемое устройство «моргающее зеркало». — *Прим. ред.*

Поэтому малоформатные однообъективные зеркальные фотокамеры с центральным затвором больше не выпускаются.

В большинстве малоформатных однообъективных зеркальных фотокамер используются определенные способы синхронизации работы затвора и фотоспышки или электронной вспышки. Обычно фотокамеры снабжаются ползунками для крепления лампы-вспышки с центральным синхроконтактом, а также контактом штепсельного разъема в корпусе камеры. Импульсное освещение подробно обсуждается в гл. 10.

Большинство малоформатных однообъективных зеркальных фотокамер имеет встроенное экспонометрическое устройство, которое используется для определения необходимой экспозиции. На светочувствительный приемник экспонометра попадает часть света, проходящего через объектив. Образующийся электрический сигнал приводит в действие либо стрелочный экспонометр, либо электронное световое табло (на светодиодах или жидкких кристаллах). Этот метод определения экспозиции имеет ограничения, которые будут обсуждаться ниже. В некоторых полностью автоматических однообъективных зеркальных фотокамерах действие экспонометра согласовано с работой затвора и (или) диафрагмой, что позволяет устанавливать

экспозицию автоматически. Если фотограф установил диафрагму, а экспонометр управляет продолжительностью выдержки, то этот режим называется *автоматической экспозицией с предварительной установкой диафрагмы*. В обратном случае операция называется *автоматической экспозицией с предварительной установкой выдержки*. Некоторые камеры сконструированы так, что могут работать в любом из этих режимов. В большинстве автоматических однообъективных зеркальных камер предусмотрена возможность отключения автоматики, позволяющая фотографу устанавливать экспозицию вручную. Эта возможность является весьма желательным качеством фотоаппарата. Удобство и практичность камеры зависят от конструкции отключателя автоматики.

Современные малоформатные однообъективные зеркальные фотокамеры часто снабжаются и другими дополнительными приспособлениями. К ним относятся электрический привод для быстрого взведения затвора и перемещения пленки, таймер для задержки начала экспонирования после того, как кнопка срабатывания затвора приведена в действие (автоспуск), автоматическое регулирование интенсивности фотовспышки с использованием встроенного экспонометра для контроля световой энергии вспышки.

Другим типом малоформатной камеры является фотокамера с дальномером (рис. 2.10). Для определения границ снимаемого кадра и для наводки на резкость фотограф использует не объектив этой фотокамеры, а оптический видоискатель, который совмещен с дальномером и расположен на верхней крышке фотокамеры (рис. 2.10). Свет от предмета *X*, прежде чем попасть в глаз (рис. 2.11), проходит через входное окно *A* и сквозь полуупрозрачное зеркало. Свет от того же предмета проходит через второе входное окно *B*, отражается от поворачивающегося посеребренного зеркала и, отражаясь от полуупрозрачного зеркала, попадает в глаз наблюдателя

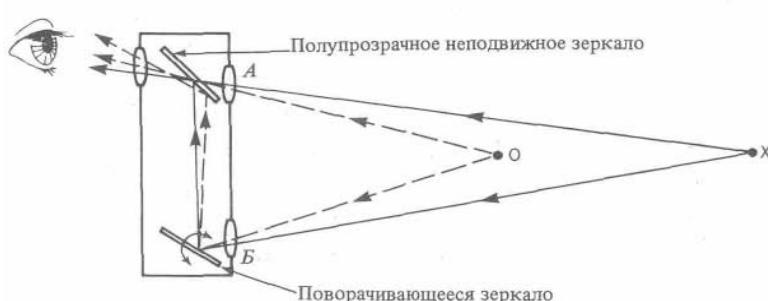
Рис. 2.10.

Фотоаппарат Leica M4P с 50-мм объективом (ЭНМ, 1983 г.) *1* — входные окна видоискателя

Например, зеркало за окном *B* повернуто так, чтобы лучи, отраженные от предмета *X* и прошедшие сквозь окна *A* и *B*, совпали; тогда изображения предмета *O* будут смешены относительно друг друга (рис. 2.12). Край оправы объектива присоединен к механизму, который поворачивает зеркало позади окна *B* при перемещении объектива. С помощью фокусирующего кольца движения зеркала и объектива регулируются так, что, когда объектив сфокусирован на любой точке объекта (например, *X*), изображения, видимые глазом, в визире совпадают. Обычно смещаемая часть изображения (получаемая через окно *B*) составляет небольшую центральную часть всего кадра. Пучок света, образующий это изображение, часто пропускают через светофильтр (обычно желтый или розовый), чтобы можно было отличать его от остального изображения в видоискателе, видимого через окно *A*. Изображение, видимое через окно *A*, представляет собой полную снимаемую картину, поэтому его используют при компоновке кадра.

Рис. 2.11.

Принцип действия дальномера Точка *X* — в фокусе, точка *O* — не в фокусе



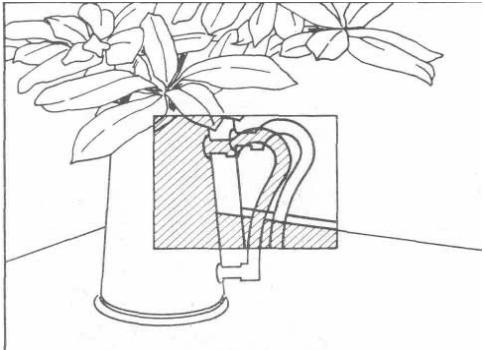
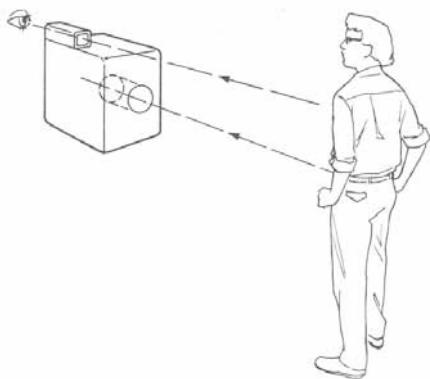


Рис. 2.12.

Смещение изображения в дальномерном устройстве. Малый прямоугольник представляет изображение, ограниченное рамкой входного окна *Б* на рис. 2.11

Такой способ определения границ объекта съемки не требует большогодвигающегося зеркала, как в однообъективных зеркальных камерах, что обеспечивает бесшумность работы и является преимуществом фотокамер с дальномером. Кроме того, фокусирующая система таких камер дает настолько яркое рассматриваемое изображение, что позволяет наводить на резкость даже при слабом освещении. Видоискатель в

более простых камерах такого типа не обеспечивает точного совпадения границ кадра на пленке и в видоискателе. Простая фотокамера с видоискателем, когда для визирования не используется съемочный объектив, не дает точного представления о том, что действительно получится на пленке (рис. 2.13). Центр поля зрения, рассматриваемого через видоискатель, будет несколько выше и правее центра снимка. Это несовпадение, называемое *параллаксом*, может быть источником ошибки при фотографировании близлежащих объектов. Видоискатели более дорогостоящих фотокамер с дальномером маркированы таким образом, чтобы можно было частично скорректировать эту ошибку незначительным изменением направления наводки фотокамеры. Фотоаппарат Leica M4P, изображенный на рис. 2.10, имеет встроенный в видоискатель механизм, который перемещает видоискатель вертикально вниз при наводке объектива фотокамеры на близлежащие объекты.



В основном в 35-мм фотокамерах с дальномером применяются центральные фотозатворы, и поэтому большинство из них не имеет сменных объективов. Такие затворы более приспособлены для работы с импульсными источниками света, особенно когда применяется электронная вспышка в качестве подсветки при дневном освещении. Более подробно использование различных источников света обсуждается в гл. 10.

Рис. 2.13.

Возникновение параллакса в фотоаппаратах с видоискателем — несовпадение оптических осей видоискателя и объектива.

Фотоаппарат Leica M4P, изображенный на рис. 2.10, является исключением из рассматриваемого класса 35-мм фотокамер.

Этот аппарат имеет не только сменные объективы, но и шторный затвор<sup>1)</sup>. Так как у разных объективов угол поля изображения различный, предусмотрена автоматическая регулировка видоискателя для согласования поля зрения и поля изображения для каждого сменного объектива. Кроме того, видоискатель устроен так, что вводится поправка на параллакс для каждого объектива.

В 35-мм фотокамерах с дальномером также применяют и многие другие различные приспособления, которыми снабжены 35-мм однообъективные зеркальные фотокамеры. Раньше фотокамеры с дальномером конструктивно были проще и имели меньшие размеры, чем однообъективные зеркальные фотокамеры. Но теперь это не так. Фотокамера Leica — одна из наиболее совершенных 35-мм камер с дальномером — лишь немногим меньше, чем компактная 35-мм однообъективная зеркальная камера. Большинство остальных 35-мм фотокамер с дальномером относительно недорогие и достаточно компактные. Хотя эти камеры просты в обращении, некоторые из них снабжены автоматической установкой экспозиции без возможности ручного режима. Кроме того, в некоторых камерах предусмотрена автоматическая наводка на резкость. Эти камеры сконструированы для того, чтобы делать «неожиданные» (*моментальные*) снимки.

<sup>1)</sup> Сменная оптика и шторный затвор используются и в отечественных дальномерных камерах, например ФЭД и Киев-4. — Прим. ред.

В некоторых случаях требуются большие изображения, чем те, которые получаются с помощью 35-мм фотокамеры. В большинстве среднеформатных фотокамер используется роликовая пленка шириной 61,5 мм, зарядки которой обозначаются числами 120 либо 220 (читается один-двадцать или два-двадцать). Пленка один-двадцать намотана с черной бумажной защитной лентой, в то время как пленка два-двадцать имеет непрозрачное покрытие, которое удаляется при обработке.

Ширина изображения для этих пленок обычно составляет 56 мм. Форма кадра может быть квадратной или прямоугольной.

В однообъективных зеркальных фотокамерах используется этот тип пленки для нескольких разных форматов. Квадратный формат с номинальным размером изображения 6х6 см дает действительный размер изображения 5,6х5,6 см. В некоторых моделях однообъективной зеркальной фотокамеры такого формата Hasselblad используется центральный затвор. Фотокамера Pentax 6x7 имеет номинальный размер кадра 6x7 см, а Mamiya M645 — 6x4,5 см. Большинство таких фотокамер весьма похожи на увеличенный вариант 35-мм однообъективной зеркальной камеры и работают сходным образом (рис. 2.14).

К среднеформатным зеркальным фотокамерам относится и двухобъективная зеркальная камера (рис. 2.15). Хотя эти камеры не так совершенны, как однообъективные зеркальные фотокамеры, относительно низкая стоимость приводит к их большому распространению в среднеформатной фотографии. В двухобъективной зеркальной фотокамере обычно используется пленка 120, и она имеет формат 6х6 см. Два одинаковых объектива расположены один над другим (рис. 2.16). Верхний объектив служит как видоискатель и дальномер. Фиксированное зеркало отражает изображение снимаемой картины, полученное верхним объективом, на матовое стекло, которое можно рассматривать либо непосредственно, либо через окуляр, который помогает наводить объективы на резкость.

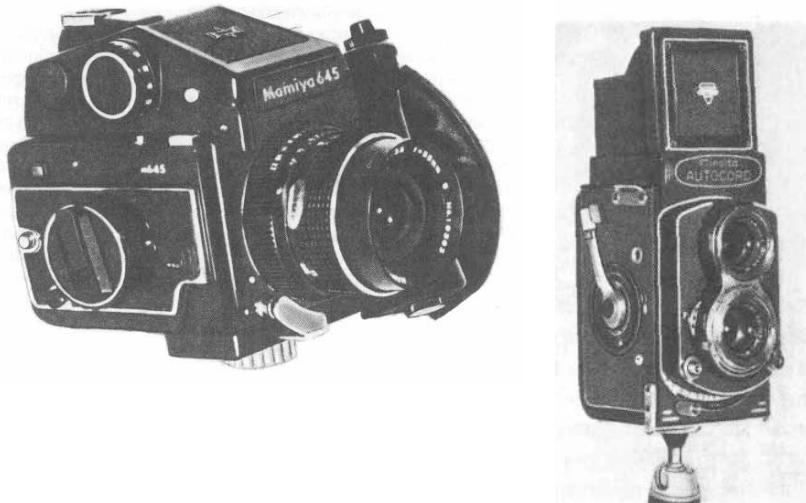


Рис. 2.14.

Среднеформатная однообъективная зеркальная фотокамера Mamiya M645 (ЭНМ, 1983 г.).

Рис. 2.15.

Двухобъективная зеркальная фотокамера Minolta Autocord (ЭНМ, 1983 г.)

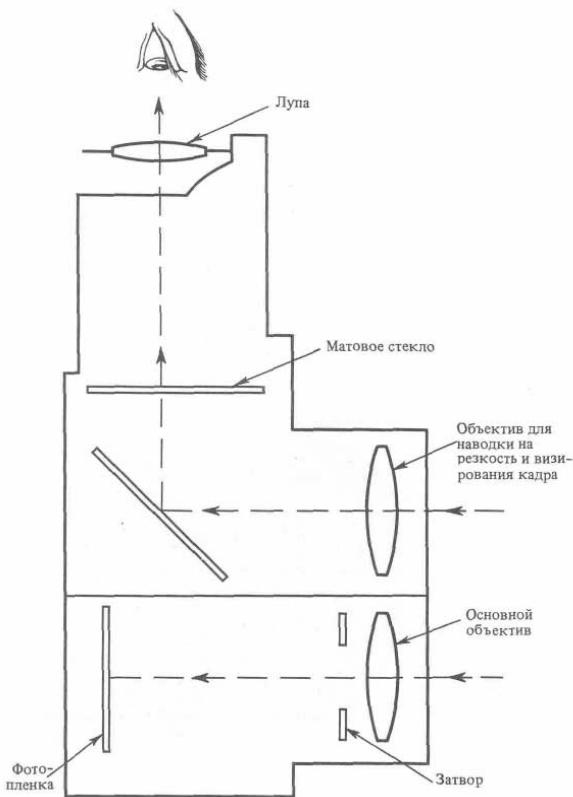


Рис. 2.16.

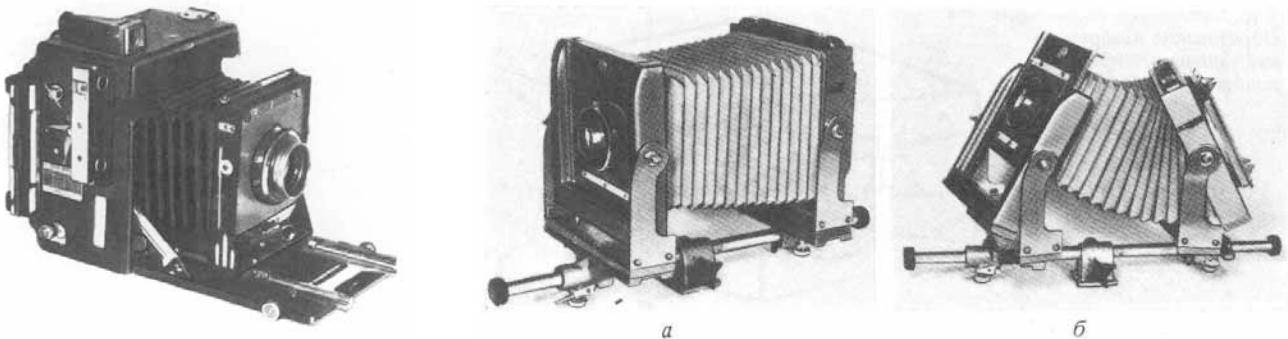
Принципиальная схема двухобъективной зеркальной фотокамеры

Изображение регистрируется на пленке, когда центральный затвор нижнего объектива открывается. Получаемое изображение в видоискателе такое же, как и на пленке, за исключением небольшого несоответствия за счет параллакса. Зеркало, используемое в видоискателе, дает зеркальное изображение на матовом стекле. Наиболее совершенные камеры этого типа имеют сменные объективы, призматические видоискатели и другие дополнительные устройства и принадлежности, и их стоимость сравнима со стоимостью некоторых среднеформатных однообъективных зеркальных фотоаппаратов.

Принципиально фотокамеры с дальномером могут использоваться и для среднеформатной съемки, но это довольно непросто. Примером является камера Koni-Omega Rapid, которая имеет формат 6x7 см, сменные объективы и устройство, позволяющее перемещать пленку вручную быстрее, чем во многих среднеформатных фотоаппаратах.

Большинство распространенных фотокамер

большого формата использует плоские форматные фотопленки, размеры которых 9x 12 см или 24x30 см. Эти фотокамеры главным образом применяются для павильонных и студийных съемок. Складная фотокамера форматом 9x12 см (рис. 2.17), несмотря на свои довольно большие размеры, считается портативной фотокамерой среди крупноформатных аппаратов. Такие фотокамеры чаще находятся в открытом состоянии чем в закрытом, ибо подготовка их к работе может быть достаточно сложной. В камере используется матерчатый светозащитный мех, предотвращающий попадание постороннего излучения в пространство между объективом и светочувствительным материалом. Дальномер и видоискатель могут быть объединены в один узел, но в ответственных случаях съемки для рассматривания изображения, образованного объективом,



используется матовое стекло, расположенное в плоскости пленки.

Рис. 2.17.

Складная фотокамера Speed Graphic 4x5 в рабочем состоянии (ЭНМ, 1983 г.) слева

Рис. 2.18.

а — общий вид фотоаппарата для павильонных съемок; б — максимально возможные изменения положения объектива и кассетной части аппарата (ЭНМ, 1983 г.). справа

При наводке на резкость открывают затвор объектива и смещают объектив относительно корпуса фотокамеры (плоскости пленки), пока изображение предмета не сфокусируется на матовом стекле. Чтобы снять кадр, затвор закрывают, матовое стекло заменяют на кассету с плоской фотопленкой и производят экспонирование.

Складные фотокамеры этого типа сконструированы для использования главным образом со штативом; пользуясь *рамочным видоискателем* и (или) дальномером, эти камеры можно использовать и для съемок с рук. В течение многих лет они применялись фоторепортерами. Многие из этих фотокамер сконструированы так, что объектив можно поднимать относительно корпуса камеры и наклонять вокруг горизонтальной оси. Эти движения, называемые *смещением* и *наклоном* объектива, иногда необходимы для уменьшения геометрического искажения изображения и улучшения резкости всего поля изображения.

*Фотоаппарат для павильонных и студийных съемок* (рис. 2.18) обеспечивает максимальную возможность изменения относительного положения объектива и кассеты. Как и в складной фотокамере, объектив студийного аппарата связан мехом с кассетной частью. Объективная доска и задняя стенка устанавливаются на направляющей штанге таким образом, чтобы обеспечить их максимальную подвижность. Студийные фотокамеры обычно имеют формат от 9x12 см до 24x30 см. О некоторых проблемах использования студийной фотокамеры можно прочесть в гл. 5.

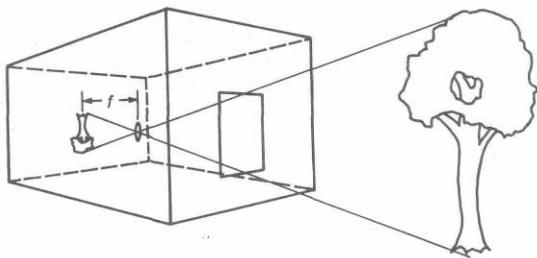
### Закон взаимозаместимости

Экспозиция фотопленки  $H$  зависит от количества света, попадающего на пленку. Количество света является мерой того, сколько света проходит сквозь объектив в данный момент времени (*освещенность*  $E$ ) и как долго открыт затвор (время экспонирования гили выдержка). Экспозиция, освещенность и время экспонирования связаны следующим образом:

$$H=Et(\text{лк}^*\text{с}). \quad (2.1)$$

Рис. 2.19.

Образование изображения удаленного предмета положительной линзой



экспозицию<sup>1</sup>). Следует отметить, что только строго определенная экспозиция фотопленки может обеспечить наилучшее качество негатива после проявления. Из закона следует, что нет никакого различия, как была получена оптимальная экспозиция  $H$ , надо только выполнить условие (2.1). В ряде случаев наблюдаются значительные отклонения от этого закона (гл. 7).

**Пример 2.1.** Известно, что в некотором конкретном случае съемки выдержка в  $1/2$  с. дает правильную экспозицию. Если увеличить время экспонирования до 1 с, то какую поправку в освещенность необходимо внести, чтобы сохранить экспозицию?

Необходимо уменьшить любым способом освещенность до половины исходного значения, так как произведение  $Et$  должно оставаться постоянным согласно равенству (2.1). Например, этого можно достичь уменьшением величины диафрагмы. В нашем примере объектив надо задиафрагмировать на одно деление.

Освещенность пленки зависит от количества света, отражаемого предметом и попадающего в объектив, а также от установленной диафрагмы, которая калибрована в значениях диафрагменных чисел. Чтобы определить диафрагменное число, сначала необходимо дать определение фокусного расстояния объектива, что сделаем практически. Предположим, что мы находимся в комнате, в которую дневной свет проходит сквозь окно. Воспользуемся простым увеличительным стеклом для проецирования изображения предмета, находящегося вне комнаты, на стену, расположенную напротив окна (рис. 2.19). Изображение будет перевернутым. Опыт показывает, что объектив должен располагаться на двух различных расстояниях от стены для того, чтобы получить резкие

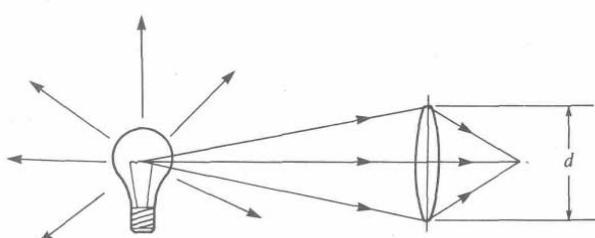
изображения оконной рамы или предмета за окном.

1) Правильнее сказать, что действие на светочувствительный материал в обоих случаях будет одним и тем же — *Прим. Ред.*

Рис. 2.20.

Образование изображения точечного источника света положительной линзой

При фокусировании оконной рамы расстояние от линзы до стены будет больше, чем при фокусировке предмета, расположенного за окном. Чем больше расстояние до предмета,



фокусировке предмета, расположенного за окном. Чем больше расстояние до предмета,

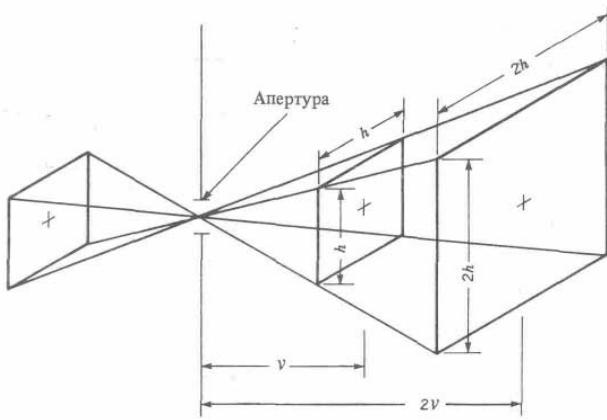
находящегося вне комнаты, тем ближе к стене должна помещаться линза для получения отчетливого изображения предмета, хотя в столь простом эксперименте это различие можно и не обнаружить.

Расстояние от стены до линзы, когда изображение удаленного предмета сфокусировано (находится «в фокусе»), называется фокусным расстоянием линзы. По существу расстояние до удаленного предмета должно быть бесконечно большим (больше, чем любое конечное расстояние, которое может быть измерено или описано). В таком случае говорят, что предмет находится «в бесконечности». В нашем эксперименте используемое расстояние с достаточной точностью позволяет определить фокусное расстояние линзы. Аналогичный эксперимент можно осуществить с объективом фотоаппарата. Однако, прежде чем определять фокусное расстояние такого сложного объектива, какой используется в современной фотокамере, необходимо знать положение точки, относительно которой измеряется фокусное расстояние. Для большинства объективов положение этой точки совпадает с геометрическим центром объектива. Реальное значение фокусного расстояния согласуется с тем, которое определяется экспериментально. Этот вопрос будет рассмотрен более подробно в гл. 4.

Число  $f/f$ ) для простых линз определяется как

$$f/f = f/d, \quad (2.2)$$

где  $f$  — фокусное расстояние и  $d$  — диаметр линзы. Диафрагменное число представляет собой меру светосилы линзы. Чтобы понять это, необходимо рассмотреть зависимость светосилы линзы от  $f$  и  $d$ .



освещенность  $E$  пропорциональны квадрату диаметра.

Чтобы понять зависимость освещенности от фокусного расстояния, необходимо рассмотреть зависимость яркости изображения от его расстояния до линзы. Для этой цели воспользуемся *стеноп-камерой*<sup>1)</sup>. Представим себе, что с помощью этой камеры получаем изображение прямоугольника (рис. 2.21). Заметим, что изображения прямоугольника растут с увеличением расстояния до плоскости изображения. Длина стороны прямоугольника  $h$  пропорциональна расстоянию от отверстия до плоскости изображения  $v$ . Следовательно, площадь изображения прямоугольника пропорциональна квадрату расстояния от отверстия до плоскости изображения. Полное количество света, собранного отверстием, не зависит от положения плоскости изображения. По мере того как плоскость изображения отодвигается от отверстия, то же общее количество света будет освещать площадь, которая увеличивается как  $v^2$ . Следовательно, освещенность любой точки изображения обратно пропорциональна  $v^2$ .

**Пример 2.2.** Как изменится яркость изображения, если расстояние от отверстия до плоскости изображения удваивается?

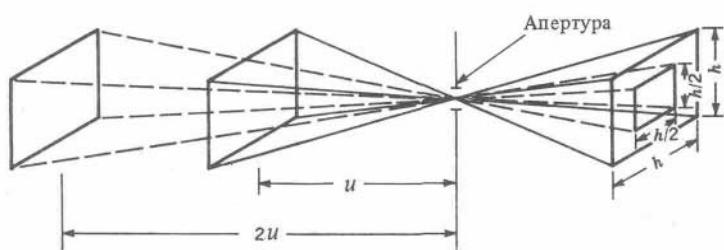
Яркость пропорциональна освещенности плоскости изображения. Если изображение находится на расстоянии  $v$  от отверстия, то

площадь изображения равна  $h^2$  (рис. 2.21).

Рис. 2.21.

Изменения размеров изображения в зависимости от расстояния объектив — объект.

Если  $v$  удвоить, то  $h$  также удвоится, и новая площадь будет равна  $(2h)^2$  или  $4h^2$ , т. е. площадь увеличится в



четыре раза. Освещенность любой точки нового изображения будет в четыре раза меньше освещенности первого изображения.

Изображение, формируемое современной фотокамерой с объективом, имеет те же самые характеристики, что и в случае стеноп-камеры.

" См разд «Словарь терминов» — Прим. Перев.

Так как изображение объекта, находящегося на бесконечном расстоянии от объектива, формируется на расстоянии, равном фокусному, количество света, достигающего плоскости изображения, обратно пропорционально фокусному расстоянию ( $E \sim 1/f^2$ ). Если объединить зависимости освещенности от диаметра объектива и от фокусного расстояния, то получим

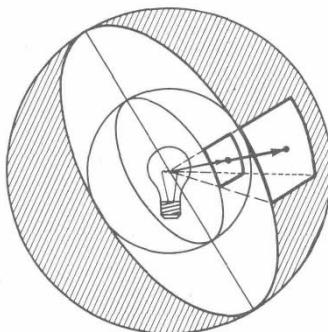
$$E \sim d^2/f^2 = K(d^2/f^2), \quad (2.3)$$

где  $K$  — константа пропорциональности, зависящая от единиц измерения освещенности. Из (2.2) получим, что  $d/f = l/f$ . Следовательно,  $E = K(l/f)^2$ . (2.4)

Строго говоря, полученное выражение справедливо только для объектов, которые удалены на бесконечность. Если камера сфокусирована на близлежащие объекты, то объектив должен быть отодвинут от плоскости изображения. Однако, если предметы не находятся очень близко от камеры, величина сдвига будет мала по сравнению с фокусным расстоянием объектива, и равенство (2.4) будет достаточно точным. Поправки должны учитываться в случае *макрофотографии* (гл. 5).

Как следует из рис. 2.21, яркость изображения зависит от расстояния между камерой и предметом. В подтверждение этого можно отметить, что если предмет отодвинуть от входного отверстия, то размер изображения уменьшается. Например, если расстояние до предмета удваивается, высота и ширина изображения уменьшаются в два раза (рис. 2.22) и площадь изображения уменьшается в четыре раза. Если воспользоваться рассуждениями, подобными тем, которые мы использовали при рассмотрении рис. 2.21, то может показаться, что в результате яркость изображения увеличится в четыре раза. Однако это произошло бы только в том случае, если бы количество света, попадающего в апертуру объектива, осталось неизменным.

Представим себе, что точечный источник света испускает световые лучи во всех направлениях (рис. 2.23). Все лучи берут начало от светового источника. Известно также, что чем дальше находится лампа, тем тусклее она выглядит. Пусть в центре двух концентрических прозрачных сфер помещен источник света. Через поверхность каждой сферы проходит одинаковое число лучей.



**Рис. 2.23.**

Иллюстрация закона обратных квадратов.

Интенсивность света, падающего на единицу площади поверхности большей сферы меньше, чем для меньшей, так как одинаковое количество света (одинаковое число лучей или одинаковый световой поток) освещает обе сферы. Освещенностью  $E$  называется количество света, падающего на единицу площади, и для любой сферы эта величина равна полному потоку  $F$ , деленному на площадь сферы  $4\pi R^2$ , где  $R$  — радиус сферы. Таким образом,  $E = F/(4\pi R^2)$ . (2.5)

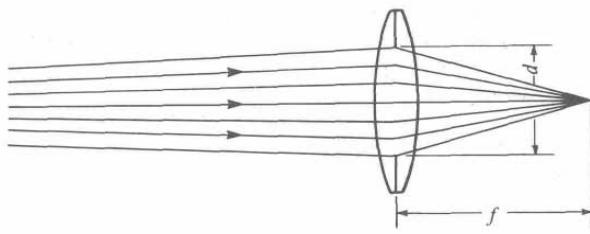
Это соотношение — так называемый закон Гаусса или закон обратных квадратов. Если  $R$  удваивается, площадь увеличивается в четыре раза и освещенность уменьшается в четыре раза. Если фотограф использует фотокамеру с фиксированным значением диафрагмы, чтобы сделать снимок рассматриваемого источника света, то при удалении камеры на расстояние, вдвое большее первоначального, количество света, собираемого диафрагмой, уменьшится в четыре раза. Принимая во внимание рис. 2.22 и сделанное замечание, заключаем, что одна четвертая часть света освещает изображение, имеющее вчетверо меньшую площадь.

Если диафрагма объектива открыта не полностью, то способность собирать свет определяется отверстием диафрагмы, а не диаметром объектива. Если диафрагма встроена в объектив, то в выражении, определяющем диафрагменное число  $f$ , необходимо вместо диаметра объектива использовать диаметр действующего отверстия диафрагмы. В реальном объективе этого делать нельзя. Однако нечто похожее все же можно сделать. С этой целью вообразим, что диафрагма помещена внутри объектива (рис. 2.24). (Тех читателей, кто заинтересуется этим вопросом более подробно, отсылаем к книге Моргана<sup>1)</sup>). Воспользуемся выражением (2.2), где, как уже отмечалось,  $d$  — диаметр отверстия диафрагмы.

<sup>1)</sup> Morgan, Introduction to Geometrical and Physical Optics — N. Y • McGraw-Hill, 1953, p. 81

Рис. 2.24.

Светосила линзы, ограниченной диафрагмой.



способность «собирать» свет, т.е. обеспечивают одинаковую яркость изображения, не зависящую от фокусного расстояния. Объектив с большим фокусным расстоянием должен иметь отверстие большего диаметра, чем объектив с меньшим фокусным расстоянием, для того чтобы диафрагменные  $f$ -числа этих объективов совпадали [см. выражение (2.2) и рис. 2.25]. Если бы объективы были маркированы в величинах диаметра отверстия, то должно быть известно фокусное расстояние объектива, чтобы можно было определить его способность собирать свет. В наше время широкого использования сменной оптики это очень бы затруднило практическую работу. Принятая система может показаться несколько сложной, но большинство других оказывается еще хуже.

Из выражений (2.1) и (2.4) следует

$$E=K(l/f)^2 t. \quad (2.6)$$

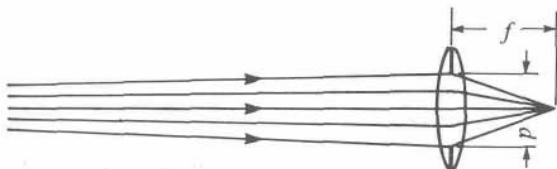
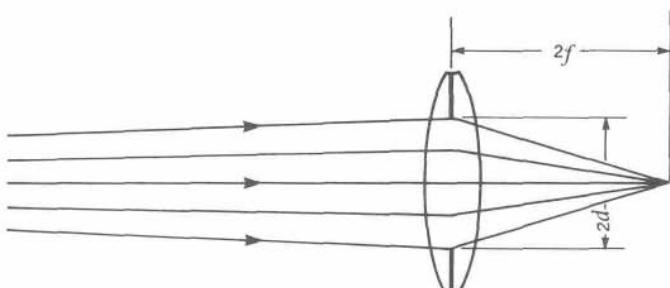


Рис. 2.25.

Две линзы с различным фокусным расстоянием и внешним диаметром имеют одинаковые относительные отверстия



**Таблица 2.1. Величины выдержек и их обозначения в современных фотоаппаратах**

| Обозначение выдержки | Выдержка, с |
|----------------------|-------------|
| 1                    | 1           |
| 2                    | 1/2         |
| 4                    | 1/4         |
| 8                    | 1/8         |
| 15                   | 1/15        |
| 30                   | 1/30        |
| 60                   | 1/60        |
| 125                  | 1/125       |
| 250                  | 1/250       |
| 500                  | 1/500       |
| 1000                 | 1/1000      |

Количество света, достигающего пленки, может регулироваться либо изменением отверстия диафрагмы, либо временем экспонирования (выдержкой). Желательно, чтобы конструкция фотокамеры позволяла изменять количество света, достигающего пленки, именно в два раза при переходе к соседним значениям шкалы диафрагмы или *скорости срабатывания затвора*. Этот способ изменения освещенности согласуется со способом, которым глаза и мозг фиксируют различные уровни освещенности, причем субъективная реакция глаза на освещенность

логарифмическая (гл. 8). Большинство современных регуляторов скорости срабатывания затвора маркировано, как показано в табл. 2.1. Время экспонирования (выдержка) в секундах обратно указанным в таблице числам (т.е. единица, деленная на это число). Отметим, что любые два последующих значения выдержки отличаются друг от друга в два раза.

Большинство регуляторов скорости срабатывания затвора имеет еще положения, маркованные буквами *B* или *T* (от английского слова *time* — время). При установке указателя регулятора затвора в положение *B* затвор остается открытым до тех пор, пока нажата спусковая кнопка. В положении *длительной выдержки T* затвор закрывается после того, как кнопка затвора нажимается во второй раз.

Для того чтобы построить шкалу значений диафрагменных чисел, воспользуемся равенством (2.4), откуда следует, что диафрагменные числа обратно пропорциональны корню квадратному из освещенности ( $f'/\sim 1/\sqrt{E}$ ). Предположим, что ряд значений освещенности такой, что каждое последующее значение в два раза меньше предыдущего (табл. 2.2). Вычислив их обратные величины и затем квадратные корни, найдем значения  $1/\sqrt{E}$  (табл. 2.2). Если их округлить до двух значащих цифр, то получим стандартные диафрагменные числа, которыми маркованы современные фотообъективы. Эти числа иногда называют *значением диафрагмы* или просто *диафрагмой*<sup>1)</sup>. Отметим, что чем больше установленное диафрагменное число, тем меньше света будет достигать пленки. Напомним, что шкала диафрагменных чисел разработана так, чтобы освещенность при переходе к соседним значениям изменялась в два раза. Наиболее длиннофокусные объективы могут иметь на шкале и еще большие диафрагменные числа, но все они подчиняются той же закономерности.

**Таблица 2.2. Диафрагменные числа**

|                   |   |     |     |     |      |      |      |       |       |       |        |
|-------------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| <i>E</i>          | 1 | 1/2 | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 | 1/64 | 1/128 | 1/256 | 1/512 | 1/1024 |
| <i>1/E</i>        | 1 | 2   | 4   | 8   | 16   | 32   | 64   | 128   | 256   | 512   | 1024   |
| <i>1/\sqrt{E}</i> | 1 | 1,4 | 2   | 2,8 | 4    | 5,6  | 8    | 11,2  | 16    | 22,4  | 32     |
| <i>f'</i>         | 1 | 1,4 | 2   | 2,8 | 4    | 5,6  | 8    | 11    | 16    | 22    | 32     |

1) Нередко разницу между делениями шкалы диафрагмы называют ступенями — *Прим. перев.*

Когда фотографы говорят о *раскрытии* объектива, это означает, что они уменьшают установленное диафрагменное число. Когда они говорят о *закрытии* объектива или об *уменьшении действующего отверстия* объектива, они подразумевают противоположное.

Увеличение диафрагменного числа приводит к тому, что части сюжета, находящиеся впереди и позади выбранного объекта, также становятся более резкими. Другими словами, *глубина резко изображаемого пространства* увеличивается с уменьшением действующего значения объектива. Для предотвращения появляющегося сдвига изображения движущегося объекта необходимо использовать более короткое время экспонирования. Если желательно подчеркнуть движение, то выбирают большую выдержку. Все эти вопросы подробно обсуждаются в гл. 5. При использовании пленок с различной светочувствительностью необходимо пользоваться различными комбинациями выдержки и диафрагменных чисел. Это также справедливо при изменении освещенности.

**Пример 2.3.** Допустим, что правильная экспозиция снимаемой сцены, определенная с помощью экспонометра, равна 1/500 с при диафрагменном числе 2. При рассматривании сюжета в видоискателе однообъективной зеркальной фотокамеры фотограф обнаружил, что можно улучшить впечатление от получаемого изображения, если увеличить глубину резко изображаемого пространства, установив диафрагменное число 4. Какую выдержку необходимо выбрать, чтобы получить правильное экспонирование?

Если диафрагма объектива уменьшается на две ступени от 2 до 4, то освещенность пленки уменьшается в четыре раза. Из закона взаимозаместимости видим, что необходимо увеличить время экспонирования в четыре раза — от 1/500 до 1/125 с — и установить регулятор скорости затвора в положение 125. Остальные эквивалентные сочетания факторов экспозиции для рассматриваемой фотографической ситуации представлены в табл. 2.3.

Кольца установки диафрагмы большинства современных объективов снабжаются *стопорным устройством*, значительно упрощающим точную установку диафрагмы.

**Таблица 2.3. Эквивалентные сочетания факторов экспозиции для случая, рассмотренного в примере 2.3**

|                     | Эквивалентные сочетания факторов экспозиции <sup>3</sup> |     |      |      |      |       |       |       |        |
|---------------------|--|-----|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| Диафрагменное число | 22   | 16  | 11   | 8    | 5,6  | 4     | 2,8   | 2     | 1,4    |
| Время               | 1/4  | 1/8 | 1/15 | 1/30 | 1/60 | 1/125 | 1/250 | 1/500 | 1/1000 |
| Установка затвора   | 4  | 8   | 15   | 30   | 60   | 125   | 250   | 500   | 1000   |

<sup>3</sup> «Оптимальное» сочетание приведено в предпоследней колонке таблицы.

Для многих объективов существует, кроме того, возможность установки диафрагмы в промежуточные положения между некоторыми или всеми значениями шкалы диафрагмы. Эти промежуточные положения называются полуступенями и позволяют более точно устанавливать рабочую диафрагму. Если диафрагму закрыть на полступени, то количество света, попадающего на пленку, уменьшится до 70% предыдущего значения при неизменности прочих факторов экспозиции.

Возникает вопрос, почему, несмотря на то, что одна ступень диафрагмы уменьшает пропускание света на 50%, полступень изменяет это количество не до 75%, а до 70%. Вспомним, что калибровка освещенности подчиняется логарифмическому закону. Это значит, что увеличение относительного отверстия диафрагмы на  $n$  ( $n$  — целое число) ступеней приводит к усилению освещенности в  $2n$  раз. Тогда увеличение числа // еще на полступени по той же самой шкале будет соответствовать росту освещенности в  $2^{n+1/2}$ . Например, если освещенность при диафрагме 4 принять за 1 ( $2^0$ ), то освещенность при диафрагме 2,8 будет равна  $2^{(2^1)}$ , и освещенность при изменении // на полступени между диафрагмами 4 и 2,8 составит  $2^{0+1/2} = 1,4$ . Следовательно освещенность увеличится на 40%. При закрытии диафрагмы освещенность уменьшается до  $1/1,4 = 0,71$ , или до —70%, своего первоначального значения. Значение диафрагменного числа для такой установки диафрагмы будет равно  $2^{7/4} = 3,4$ . Кроме значений диафрагмы, перечисленных в табл. 2.2, кольцо управления диафрагмой маркировано значением максимального раскрытия объектива, которое часто выпадает из значений стандартной шкалы диафрагм (например, может быть равно 1,8 или 3,5). Эти числа сложились исторически и означают изменение не на полступени, а на треть ее. Если освещенности для различных значений диафрагмы подчиняются закону  $2^n$ , то в случае изменения еще на 1/3 ступени они будут изменяться в  $2^{n \pm 1/3}$  раз (см. предыдущие рассуждения). Освещенность при диафрагме 1,8, которая получается раскрытием диафрагмы 2 на 1/3, соответствует 125% начальной освещенности. Аналогично установка диафрагмы 3,5 соответствует открытию диафрагмы 4 на 1/3 и дает то же увеличение освещенности.

#### Определение экспозиции

В примере 2.3 показана взаимосвязь между эквивалентными значениями диафрагмы и выдержками, однако вопрос определения правильной экспозиции еще остается открытым. Для нахождения исходных значений этих параметров должна быть известна чувствительность пленки. Последняя связана главным образом со способом изготовления пленки. В проявленном негативе количество серебра может незначительно меняться в течение фотографической обработки, но для получения наилучшего результата пленку необходимо экспонировать и обрабатывать согласно предписанию изготовителя. Светочувствительность пленки обычно указывается в единицах ASA или DIN. Если известны обе величины, то их комбинация называется светочувствительностью в единицах ISO. Более подробно эти и другие способы определения чувствительности фотопленки будут излагаться в гл. 8; здесь же мы воспользуемся единицами ASA. Чем выше чувствительность пленки, тем большим числом ASA она маркирована. Светочувствительность ASA определяется таким образом, чтобы правильная экспозиция пленки была обратно пропорциональна величине ASA. Например, пленка Kodak Plus-X Pan имеет светочувствительность 125 в единицах ASA, а Kodak Ektachrome 64 — чувствительность 64 ASA. Оптимальная экспозиция для последней пленки будет в два раза больше, чем для первой при прочих равных условиях.

**Пример 2.4.** Пусть мы, фотографируя объект вне помещения и используя черно-белую пленку Kodak Plus-X Pan, определили, что оптимальная экспозиция составляет 1/250 с при диафрагме 11. Теперь мы хотим снять этот объект в цвете, используя пленку Kodak Ektachrome 64. Предполагая, что условия съемки не изменились, определить экспозицию для цветной пленки.

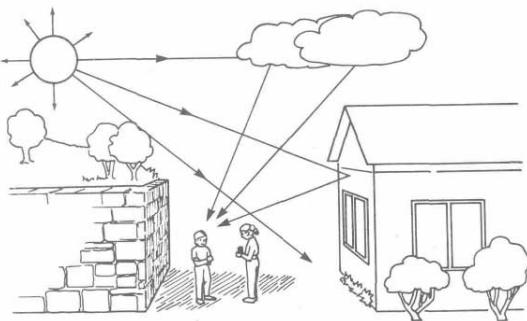
Так как чувствительность последней в два раза меньше чувствительности черно-белой пленки,

экспозицию необходимо удвоить. Это можно сделать увеличением диафрагмы до 8 при выдержке 1/250 с или увеличением выдержки в два раза (до 1/125 с) при неизменной диафрагме. Любую из этих экспозиций можно выбрать в зависимости от того что более удобно — оставить неизменной выдержку или диафрагму.

Для определения оптимальной экспозиции необходимо знать освещенность предмета. Последнюю можно определить визуально или используя экспонометр любого типа. Когда фотографирование производят при дневном свете вне помещения, правильная экспозиция достаточно хорошо определяется наблюдением за облачностью на небе. За исключением раннего утра или позднего вечера, экспозиция может быть установлена по степени облачности, если предмет освещен солнцем или небом. Различные условия освещения и соответствующие им экспозиции для пленок различной светочувствительности перечислены в табл. 2.4.

Такой способ определения экспозиций, когда знаменатель выдержки численно совпадает с величиной чувствительности в единицах ASA, называется правилом Тамба. Предполагается, что в первых трех случаях (табл. 2.4) предмет обращен к солнцу. В том случае, если предмет освещен сзади, диафрагму можно увеличить на 2 деления в зависимости от характера снимаемых объектов

и условий освещения. Последний случай в табл. 2.4 представляет ситуацию, в которой предмет освещается только светом неба и отраженным от близлежащих предметов солнечным светом (рис. 2.26). В табл. 2.4 для различных условий освещения приведено только одно значение диафрагмы, но можно пользоваться всеми эквивалентными экспозициями (см., например, табл. 2.3).



**Рис. 2.26.**

Фотографирование объекта, освещенного светом неба и отраженным от окружающих предметов солнечным светом (полутень)

**Пример 2.5.** Мы фотографируем в яркий солнечный день бегущих легкоатлетов. Для этого используем черно-белую пленку со светочувствительностью 125 ASA. Чтобы уменьшить нерезкость контуров фигур, предпочтительно использовать выдержку 1/500 с. Какой должна быть экспозиция сюжета при прямом солнечном освещении?

Из табл. 2.4 получим, что при ярком солнце экспозиция должна определяться диафрагмой 16 и выдержкой 1/ASA с. Светочувствительность пленки 125 ASA; следовательно, правильная экспозиция будет достигнута при диафрагме 16 и выдержке 1/125 с. Чтобы предотвратить на снимке нерезкость

**Таблица 2.4. Правило Тамба для определения экспозиции в условиях дневного освещения**

| Условия освещения   | Диафрагменное | Выдержка, с <sup>1)</sup> |
|---|---------------|---------------------------|
| Яркое или затянутое дымкой солнце, светлый песок или снег (резкие тени) | 22            | 1/ASA                     |
| Яркое или в дымке солнце (резкие тени)                                  | 16            | 1/ASA                     |
| Солнце, затянутое в дымке (размытые тени)                               | 11            | 1/ASA                     |
| Светлая облачность (без теней)  | 8             | 1/ASA                     |
| Пасмурный день (темная облачность)                                      | 5,6           | 1/ASA                     |
| Полутень  | 5,6           | 1/ASA                     |

1) В знаменатель выдержки нужно поставить численное значение светочувствительности пленки в единицах ASA или ГОСТ и округлить до ближайшего значения выдержки, имеющейся на фотокамере — *Прим ред.*

контуров фигур, необходимо использовать эквивалентную экспозицию: диафрагму 8 и выдержку 1/500 с.

Часто используются пленки со светочувствительностью 400 ASA. Однако большинство фотокамер не обеспечивает скорость срабатывания затвора 1/400 с. В качестве исходного времени экспонирования для этих пленок используют выдержку 1/500 с вместо 1/400 с. Это приводит к недодержке на 20%, что, однако, легко устранимо<sup>1)</sup>.

Отметим, что экспозиция определяется в зависимости от условий освещенности предмета.

Например, экспозицию с диафрагмой 22 при выдержке 1/ASA выбирают при фотографировании предмета на песке или на снегу, так как в этих условиях отраженный свет увеличивает освещенность предмета.

В тех случаях, когда об освещенности нельзя судить визуально, для ее измерения используют экспонометры, что приводит к более точным результатам. Наилучшим образом подходит для этой цели экспонометр, измеряющий падающий свет (освещенность). Можно также использовать экспонометр, определяющий отраженный свет (яркость), но с большей осмотрительностью (гл. 9). Большинство экспонометров, вмонтированных в фотокамеры, измеряет отраженный свет. В этой главе описываются наиболее простые способы применения экспонометров этого типа.

Эспонометры, работающие по яркости сюжета, измеряют свет, отраженный от предмета в фотокамеру. Показания прибора и экспозиция, определяемая на основе этих показаний, зависят от количества света, отражаемого предметом. Темные объекты, такие, как темная ткань, отражают мало света, в то время как светлые предметы отражают больше света. Представьте себе предмет, состоящий из белой и черной ткани. При измерении экспонометром яркости черной ткани будет получена одна экспозиция. В случае измерения яркости белой ткани будет получена другая экспозиция, значительно отличающаяся от первой. Несмотря на это, можно сделать вполне удовлетворительный снимок объекта из черной и белой ткани. Возникает вопрос: какую же экспозицию необходимо использовать? Обе экспозиции будут неправильными, так как экспонометр фотокамеры калиброван так, чтобы указывать правильную экспозицию при измерении света, отраженного от нейтральной серой контрольной карты, отражающей 18% падающего света. Черная ткань обычно отражает около 5% падающего света, в то время как белая ткань — около 80%. Серая карта отражает приблизительно такое же количество света (18%), которое отражается от обычного сюжета в помещении<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Например, путем увеличения времени проявления или использования специальных «выравнивающих» проявителей — *Прим перев*

<sup>2)</sup> Такой сюжет съемки называется «средним» по отражательной способности — *Прим ред*

Если отражательная способность предмета не является средней, а экспонометр используется без каких-либо поправок показаний, то получаемое при стандартной обработке изображение будет такой плотности, которая должна получиться при съемке среднего сюжета с отражением 18%. Если отражательная способность предметов незначительно отличается от средней, то для определения правильной экспозиции можно использовать серую контрольную карту и измерять ее яркость экспонометром вместо яркости такого нестандартного сюжета. В противном случае в найденную экспозицию необходимо вносить поправки. Способы использования серой карты и методы коррекции экспозиции описаны в гл. 9.

Одной из возможностей определения правильной экспозиции для несреднего сюжета встроенным в камеру экспонометром является такой путь: вместо измерения яркости объекта поставим перед фотоаппаратом свою руку и измерим свет, отраженный от ладони (при условии, что рука освещена тем же самым светом, что и объект). Экспозицию, определенную подобным путем, обычно удваивают. При этом предполагается, что рука была по крайней мере умеренно чистая. Применение этого приема также описано в гл. 9.

### Упражнения

1. Объясните различия между шторным и центральным фотозатворами.
2. Почему шторный фотозатвор дает худшие результаты, чем центральный, при съемке быстродвижущихся объектов?
3. В чем состоят ограничения использования встроенного в фотоаппарат экспонометра?
4. Почему фотографы-профессионалы предпочитают однообъективные зеркальные фотокамеры всем остальным типам малоформатных камер?
5. Сравните достоинства малоформатных камер — однообъективной зеркальной и фотокамеры с дальномером.
6. Сравните достоинства мало- и среднеформатных однообъективных зеркальных фотокамер.
7. Сформулируйте закон взаимозаместимости. Что необходимо сделать, чтобы экспозиция не изменилась при увеличении выдержки в два раза?
8. Сравните диаметры двух объективов с фокусными расстояниями 50 и 100 мм, которые имеют одинаковые относительные отверстия.
9. Если диафрагменное число увеличить вдвое и не вносить никаких других изменений, то как изменится экспозиция?
10. Если диафрагма объектива открывается на одну ступень, то как изменится экспозиция?
11. Исходная экспозиция объекта выполняется при диафрагме 4 и выдержке 1/125 с. Найдите две

любые другие эквивалентные экспозиции.

12. Пленка Kodachrome 25 имеет светочувствительность 25 ASA, а Kodak Ektachrome 400 — 400 ASA. На сколько ступеней диафрагмы светочувствительность последней пленки выше по сравнению с первой?

13. При съемке объекта на открытом воздухе используется черно-белая пленка со светочувствительностью 125 ASA. Факторы экспозиции: диафрагма 11 и выдержка 1/250 с. Какой должна быть диафрагма при использовании черно-белой пленки со светочувствительностью 32 ASA, чтобы время экспонирования осталось неизменным? Каким должно быть время экспонирования, если не изменять диафрагму?

14. Если фотографируется объект днем при светлой облачности без теней с использованием пленки Kodak Plus-X со светочувствительностью 125 ASA, то какую необходимо установить выдержку при диафрагме 16?

## Глава 3. Изобразительные средства фотографии

В этой главе мы остановимся на эстетических проблемах фотографии, а также на некоторых «правилах» получения фотоснимков необходимого качества. Кроме того, обсудим основные аспекты композиции для того, чтобы помочь начинающему фотографу получать хорошие фотоснимки. Что же касается глубокого и всестороннего рассмотрения проблем композиции, то они не входят в круг вопросов этой книги.

### Что такое фотография?

Ответ на этот вопрос во многом зависит от того, когда и кому его задают. В гл. 1 рассматривалась история развития технических средств фотографии и отмечалось, что дагерротипия была первым доступным фотографическим процессом. В то время фотография применялась главным образом для изготовления портретов, поскольку объектами съемки могли быть только неподвижные предметы. До развития дагерротипии заказать портрет художнику-живописцу было доступно только состоятельным лицам. Открытие дагерротипии привело к тому, что создание портретов стало менее дорогостоящим и более доступным процессом благодаря сокращению времени на изготовление фотографического портрета и упрощению самого процесса. Кроме портретных съемок проводились также съемки пейзажей, архитектурных сооружений и бытовых сцен.

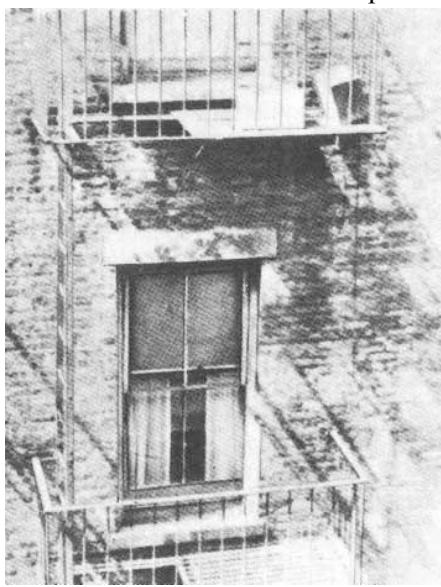
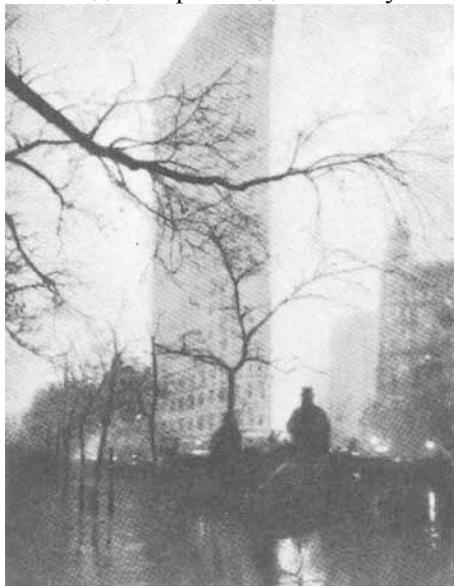
Если вопрос «Что такое фотография?» задать современному профессиональному фотографу, то его ответ не будет однозначным и, вероятно, будет зависеть от круга личных интересов фотографа. Если же вопрос касается разнообразия фотографических жанров, то могут быть названы портретные, пейзажные, документальные, рекламные, научно-технические и художественные фотографии. Из всей массы фотографов можно выделить фотолюбителей, получающих моментальные («дилетантские») снимки, серьезных непрофессиональных фотографов, получающих эстетическое удовлетворение от фотографирования, а также профессионалов, которые избрали фотографию делом своей жизни.

Часто спрашивают: является фотографирование искусством или ремеслом? Конечно, чтобы получить хороший снимок, необходимо обладать большим мастерством, как и в любом другом деле, например при изготовлении gobelenov или создании картин. Мой друг, которому посвящена эта книга, сказал, что истинное произведение искусства представляет собой

формальное выражение чувств и опыта его создателя. Если слова моего друга взять за определение произведения искусства, то и фотографии, и gobelenы, и живописные полотна могут быть произведениями искусства. Однако, если работа не выражает «чувств» мастера, она не удовлетворяет определению и не является произведением искусства. К сожалению, не всегда, глядя на работу, можно увидеть это выражение «чувств». Поэтому бывает так, что для одного зрителя произведение представляется искусством, а для другого — механическим репродуктированием. Технические средства, определяемые видом искусства, в котором работает мастер, накладывают ограничения на изобразительную сторону творчества. Хотя и художник, и ткач, и фотограф создают плоские (двумерные) изображения, используемые ими технические средства определяют характер их произведений. Эти профессиональные ограничения естественно приводят к различным критериям эстетической сущности в каждом случае. По всей видимости, художник обладает большей свободой в реализации замысла, чем фотограф. Если замысел фотографии очевиден, не обязательно относить ее к искусству или ремеслу, главное — она должна нести информацию и (или) обладать определенным воздействием на зрителя. Фотоснимок может быть охарактеризован различными способами. Например, это может быть фотография романтическая или реалистическая, абстрактная или конкретная, репортажная или полученная с

использованием специальных эффектов. Такое деление неоднозначно, но помогает понять и почувствовать замысел автора.

Большинство ранних работ Э. Стейхена можно рассматривать как романтические (рис. 3.1), хотя его поздние произведения могут с полным основанием считаться реалистическими



**Рис. 3.1.**  
Фото Э Стейхена «Здание Флетайрон в Нью-Йорке» (1905 г.) Платиновая и железоцианидная печать Музей искусств Метрополитен, коллекция А Стиглица, 1933 г

**Рис. 3.2.**  
Фото Э Стейхена «Смеющиеся коробки» (около 1922 г.) Коллекция Музея современного искусства дар С. Кутца

(рис. 3.2) Такое изменение стиля может частично объясняться совершенствованием технологии в фотографии

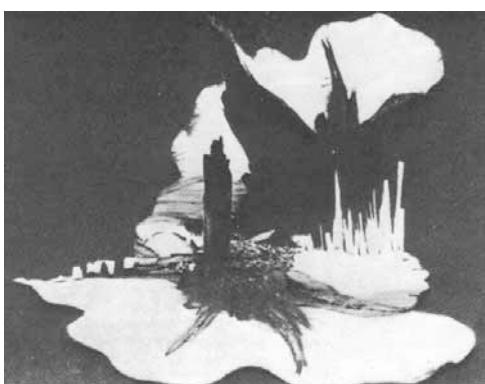
Аналогичные изменения стиля наблюдались и в работах других фотографов этого периода (рис. 3.3 и 3.4). Это объясняется тем, что любое фотографическое изображение условно, поскольку трехмерные объекты запечатлеваются в виде двумерных. Но если это так, то живописные картины также следует рассматривать как условные. Во многих случаях в них есть степень условности и абстракции. Подобно этому, фотографию без названия на рис. 3.5 следует классифицировать как абстрактную, а фотографию двух калл на рис. 3.6 — как менее абстрактную.



**Рис. 3.3.**  
Фото А Стиглица «Город Мечты» (1910 г.) Чикагский институт искусств

**Рис. 3.4.**  
Фото А Стиглица «Портрет Дж. Энгельгардта» (1921 г.) Коллекция Музея современного искусства, Нью-Йорк, коллекция А Стиглица Дар Дж О'Киф

Когда фотографы говорят об обычной съемке, они подразумевают неуправляемое фотографирование. Другими словами, в этом случае плёнка экспонируется и обрабатывается стандартным путем, и при фотопечати не применяются никакие специальные приемы. На практике в процессе печатания обычно проводится уточнение



кадрирования, а также передер живание или недодерживание<sup>1)</sup> определенных частей снимка, но такие приемы печати и обработки дают обычные фотографии.

**Рис. 3.5.**

Фото П. Капонигро (без названия) (1957 г.) Коллекция Музея современного искусства, Нью-Йорк  
Рис. 3.6.

Фото И. Канингхэм «Две каллы» (около 1929 г.) Коллекция И. Канингхэм

Под *необычными снимками* в этой книге будут пониматься фотографии, полученные в результате любого процесса, в котором экспонирование, фотообработка пленки или печать на бумаге проводились нестандартным способом. Сюда не включают работу над самим объектом съемки или его освещением. Иногда трудно сказать, применялись ли специальные приемы или нет, и поэтому приведенное определение отчасти условно. Согласно определению, снимок на рис. 3.7 не может считаться необычным. Однако некоторые зрители могут рассматривать этот снимок в значительной мере как необычную фотографию.

К специальным приемам относят многократное экспонирование фотопленки или фотобумаги<sup>2)</sup> (рис. 3.8), а также различные способы фотографической обработки, например *эффекты Сабатье и Альберта*<sup>3)</sup>, излагаемые в гл. 8. *Тонирование*, когда с помощью химического процесса изменяется цвет изображения, и использование высоко контрастной пленки для усиления контрастности отпечатка по сравнению с нормальным отпечатком также относятся к специальным приемам. Негативные изображения на фотобумаге, тона которых обратны по сравнению с оригиналом, могут также считаться необычными.

Хотя некоторые и считают фотоснимок на рис 3 7 необычным, вряд ли кто будет возражать, если назвать фотоснимок на рис. 3.9 обычной фотографией.

<sup>1)</sup> Часто подобная техника называется «вытягиванием» и «притемнением» (запечатыванием) отдельных участков изображения — *Прим перев*

<sup>2)</sup> J Szarkowski, *Mirrors and Windows*, N Y The Museum of Modern Art, 1978, p 2Ш

<sup>3)</sup> В последнее время общепринятым термином для этих процессов является соляризация. Различают соляризации полную (эффект Альберта), когда вместо негативного изображения получают позитивное, и частичную (эффект Сабатье), когда только очень ярко освещенные участки объекта съемки да от на негативе позитивное изображение — *Прим перев*  
Рис. 3.7.

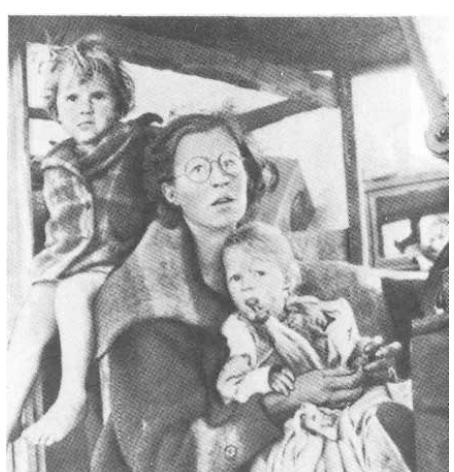
Фото Дж. Уэлсмана (без названия) (1966 г.) Copy right © 1966 Jerry N Uelsmann



**Рис. 3.8.**  
Фото Б  
(1938 г.)  
Morgan,



Морган «Весна на Мэдисон сквер»  
Copyright © Barbara  
1938



**Рис. 3.9.**  
Фото Д. Ланг «На Запад» (1939 г.) Библиотека Конгресса

Д. Шарковский организовал выставку фотографий в Музее современного искусства, названную «Зеркала и окна», представляющую американскую фотографию после 1960 г. В книге с таким же названием (сноска 2, с. 60), содержащей репродукции фотографий этой выставки, он представил свою точку зрения о путях развития современной фотографии. Главная мысль книги, отраженная в тематике выставки, состоит в том, что современные фотографы могут быть разделены на две группы. С некоторым упрощением характеристики этих двух групп приведены ниже.

В первую группу входят фотографы, которые считают основной целью самовыражение. Другими словами, целью

этой группы является выражение средствами фотографии своего отношения к некоторому объекту или ситуации. Их фотографии являются «зеркалами», отражающими восприятие авторами предметов. Вторая группа включает фотографов, которые хотят показать окружающий мир независимо от того, каким бы обыденным, странным или низменным ни был предмет. Их фотографии являются так называемыми «окнами», через которые видят мир. К первой группе относится, например, Э. Говин (рис. 3.10), ко второй — Д. Арбус (рис. 3.11).



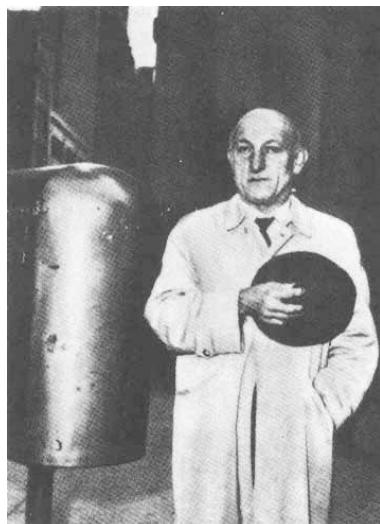
**Рис. 3.10.**

Фото Э. Говина «Данвилл, Вирджиния» (1973 г.) Copyright © Emmet Gowm 1973

Шарковский утверждает, что выражением концепции «окно» является цикл работ Р. Франка «Американцы», опубликованный в 1958 г. Например, в группу «окно» может быть включен его снимок «Политическое шоу» (рис. 3.13). Даже для тех, кто не согласен с Шарковским, его книга заслуживает внимания.



)  
M



**Рис. 3.11.**

Фото Д. Арбус «Человек на 5-й авеню в Нью-Йорке» (1969 г.) Коллекция Музея современного искусства, Нью-Йорк, Фонд А.П. Бартос

**Рис. 3.12.**

Фото М. Уайта «Кэпитол риф» (1962 г) Воспроизводится с разрешения Архива Уайта, Принстонский университет Copyright ©1982, The Trustees of Princeton University.

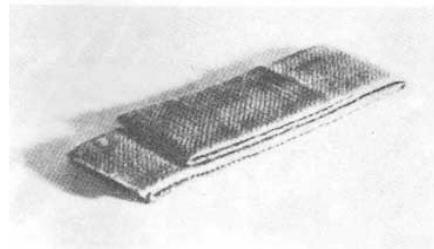
Отметим, что каждое из направлений, на которые разделилась фотография, обладает собственными достоинствами. Приведенное

в этой главе обсуждение композиции является довольно поверхностным и в первую очередь касается обычной фотографии.

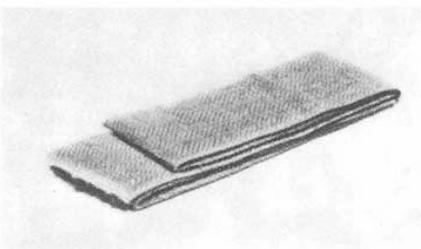


**Рис. 3.13.**

Фото Р. Франка «Политическое шоу» (1956 г.) Коллекция Музея современного искусства, Нью-Йорк



*a*



*б*

**Рис. 3.14.**

Использование тени для создания ощущения перспективы (ЭНМ, 1983 г.).

### Основные качества хорошей фотографии

Поскольку фотография передает в плоском изображении трехмерные предметы, должен быть найден способ отражения на снимке глубины изображения, ощущаемой при взгляде на

трехмерные объекты. Для этого часто используют тень, отбрасываемую телом при естественном или искусственном освещении. Отметим, что в результате образования тени от источника направленного света, освещдающего холст, фотография на рис. 3.14, а дает большее ощущение глубины пространства, чем на рис. 3.14, б, где холст освещен верхним источником света, дающим рассеянное освещение.

Хорошая фотография должна нести значительную информацию, которую необходимо передать зрителю. На рис. 3.15, д оба персонажа смотрят на свои руки, и у зрителя, не понимающего причины этого, возникает чувство недоумения. Присутствие на рис. 3.15, б футбольного мяча объясняет, почему ониглядят на руки, и мяч, который составляет сюжетно-важную часть изображения, делает снимок выразительным. Иногда желательно предоставлять зрителю возможность самому домысливать сущность фотографии. Например, в случае рис. 3.15, б такую возможность обеспечивает наличие на снимке футбольного мяча. Необходимо, чтобы на снимке присутствовали сюжетно-важные детали, а все лишние были опущены.

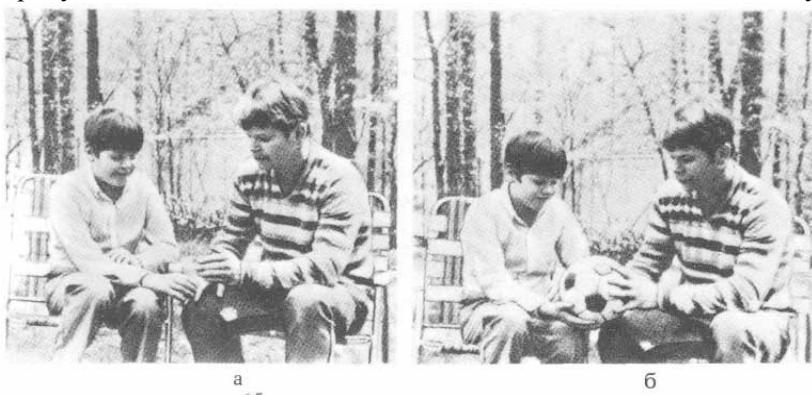


Рис. 3.15.

Включение смыслового центра в фотографию (ЭНМ, 1983 г.).

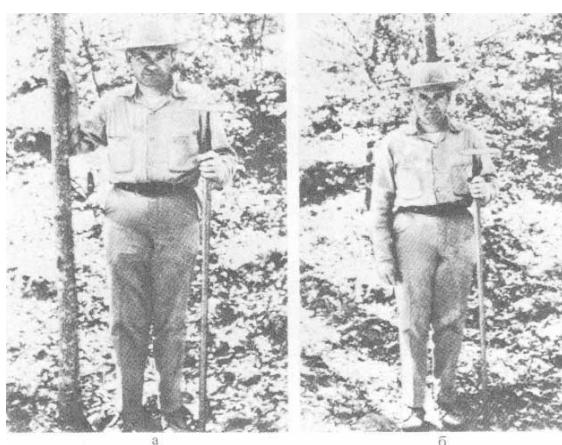


Рис. 3.16.

Присутствие на фотографии лишних деталей отвлекает внимание (ЭНМ, 1983 г.)

На рис. 3.16, а представлен портрет мужчины, одетого для работы в саду. Соломенная шляпа и мотыга, по всей видимости, указывают на занятие персонажа садоводством. Снимок вполне логичен. С другой стороны, дерево на фоне, которое кажется растущим из его головы (рис. 3.16, б), является нежелательным элементом.

Как правило, простые по построению фотографии являются более выразительными по сравнению с усложненными, хотя здесь и встречаются исключения. Читатель, вероятно, согласится, что

портрет, снятый на однородном заднем плане рис. 3.17, а, более эффектен, чем в случае использования пестрого заднего плана на рис. 3.17, б.

#### Назначение снимка

До того, как нажать на спуск затвора, фотограф должен представить себе основную цель снимка. Если он работает за плату, то цель определяется контрактом, составленным до начала работы. Если же он снимает для своего удовольствия, то мысли, побуждающие фотографа взять фотокамеру, и определяют цель. Если необходимо сделать содержательный снимок, фотограф должен подумать о том, что для этого необходимо сделать. Иногда значительные работы делаются случайно. Конечно, некоторые снимки, выполненные экспромтом, могут иметь определенные достоинства, но если снимок заранее не продуман, шанс сделать полную смысла фотографию незначителен. Этот процесс обдумывания идеи снимка начинается задолго до того, как фотограф нажмет на спуск фотозатвора, и должен продолжаться в течение всего процесса изготовления фотоснимка.

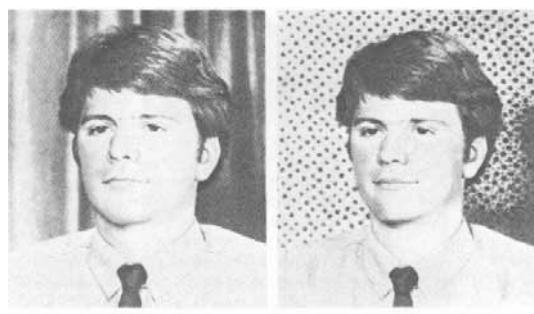


Рис. 3.17.

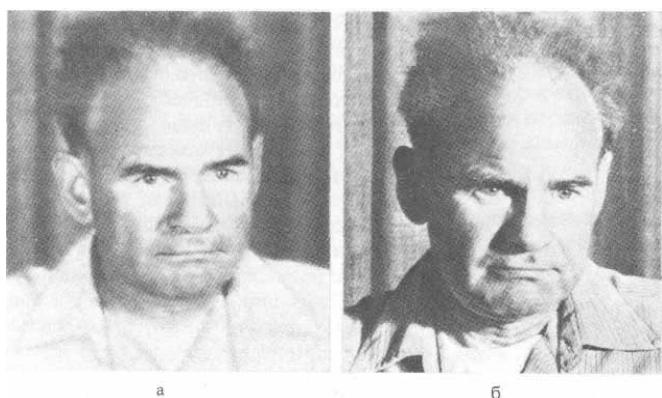
Просто решенная фотография как правило производит лучшее

впечатление (ЭНМ 1983 г.)

Например, в случае портретной съемки, когда главной целью является желание польстить человеку, может быть использован «мягкорисующий» портретный объектив (рис 3 18,а). Если же требуется подчеркнуть мужественные черты лица для создания художественного портрета, то можно воспользоваться «резкорисующим» объективом и контрастным освещением (рис 3 18,б). Поэтому, прежде чем нажать на спуск фотозатвора, фотограф должен многое предвидеть и обдумать. В противном случае часто возникают различные казусы, как например, на рис 3 16,б", где дерево кажется растищим из головы снимаемого человека. Достаточно незначительного

изменения точки наблюдения или дефокусировки заднего плана, чтобы избежать подобных ошибок. При подготовке к съемке фотографу следует тщательно осмотреть снимаемый объект и попытаться выяснить его наиболее общие черты. Фотограф должен весьма критически подходить к изучению

Рис. 3.18.  
Мягкорисующий объектив и рассеянное освещение (а) сглаживают резкие черты лица, в то время как направленный свет и резкий оптический рисунок подчеркивают особенности лица (б) (ЭНМ, 1982 г.)



а

б

модели для того, чтобы выявить все те

стороны, которые должен впоследствии увидеть зритель. Это особенно важно при фотографировании близких друзей или членов семьи, поскольку фотограф знает их намного глубже, чем посторонний зритель. Если люди знакомы в течение многих лет, то они перестают замечать друг у друга какие-либо изменения, накладываемые временем и природой. Аналогичные сложности возникают и по отношению к старым предметам, которые в течение многих лет приносили пользу своему владельцу. Например, старый автомобиль, который служил своему владельцу «верой и правдой» много лет, может казаться ему «испытанным другом», но, по всей видимости, для большинства остальных зрителей будет выглядеть грудой металлом. Важно представлять себе конечный результат, получаемый в отпечатке, как, например, в случаях, приведенных на рис. 3.18. Свадебные фотоснимки, изготавляемые по заказу, должны нравиться невесте и жениху, а также их родителям. Снимки, получаемые для собственного удовольствия, должны нравиться только фотографу. Если у фотографа есть цель — стать признанным мастером, то его работы должны удовлетворять вкусам профессиональных критиков и самой взыскательной публики.

### Композиция

В этом разделе будут проиллюстрированы основные приемы построения композиции снимка. Однако знания этих приемов часто совершенно недостаточно. Бывают такие обстоятельства, когда ни один из них не применим. Однако, даже следуя всем стандартным приемам, в результате можно получить невыразительную работу.

Поскольку в фотографии всегда присутствует элемент абстракции, очень важно правильно осмыслить композицию, которая должна легко поддаваться точному распознаванию. Например, если наблюдатель стоит на железнодорожном полотне и смотрит вдоль него, то расстояние между рельсами будет казаться уменьшающимся при удалении от наблюдателя. Однако если длиннофокусным объективом фотографируется удаленный объект и отпечаток получают с небольшим увеличением, то размеры этого объекта будут казаться большими, чем у такого же близкорасположенного объекта, при условии, что отпечаток рассматривают с расстояния наилучшего видения<sup>1</sup>). На рис. 5.16 эта ситуация демонстрируется на примере фотографирования железнодорожных вагонов. Будучи совершенно обычной на первый взгляд, фотография не дает точного воспроизведения снимаемой сцены. В действительности наблюдатель при рассматривании вагонов обнаруживает кажущееся увеличение размеров дальнего вагона по сравнению с ближним. И только случайно, если рис. 5.16 рассматривать с расстояния в несколько футов<sup>2</sup>), фотография будет казаться неискаженной.

1) См гл 5 — *Прим перев*

2) Около 1 м и более — *Прим перев*



**Рис. 3.19.**

Улица во время дождя *a* — позитивное изображение, *б* — негативное изображение (ЭНМ, 1983 г.)

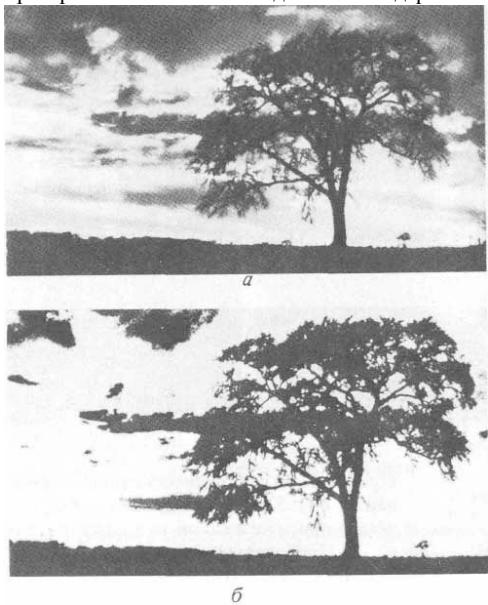
Проблема создания перспективы с общей точки зрения обсуждается в гл.5. Проблема состоит только в выборе расстояния обозрения, а не в какой-то характеристикике телефотообъектива.

Приведенное рассуждение означает не столько неуместность абстракции в фотографии или то, что она всегда плоха, сколько то, что с абстракцией всегда необходимо обращаться с осторожностью. Такие виды фотопечати, как

высококонтрастный, негативный или с использованием эффекта Сабатье (гл. 8), позволяют добиться определенных эффектов. Негативный фотоснимок улицы во время дождя (рис. 3.19, б), несомненно, удачен и для многих покажется более выразительным, чем позитивный снимок того же самого сюжета (рис. 3.19, а). Высококонтрастный снимок на рис. 3.20, б представляет собой весьма интересный, необычный и эффективный способ изображения пейзажа, хотя снимок нормальной контрастности (рис. 3.20, а) также очень удачен.

Ранее упоминалось об использовании тени для достижения эффекта глубины пространства при фотографировании предметов. Для достижения полного впечатления перспективы на снимке обычно используются так называемые *линейная и воздушная перспективы*<sup>1)</sup>, а также разная степень резкости изображения предметов. Кажущееся уменьшение расстояния между железнодорожными рельсами с увеличением дистанции от точки наблюдения является примером линейной перспективы. Например, кажущееся сужение пешеходной тропинки создает впечатление глубины пространства на рис. 3.21.

1) Более точно, кроме линейной перспективы следует говорить и о тональной перспективе, выражаящейся в изменении тонов предметов по мере их удаления. Разновидностью тональной перспективы является воздушная перспектива, при которой глубина пространства на снимке создается благодаря наличию воздушной дымки — *Прим. перев.*



**Рис. 3.20.**

Вяз в Миннесоте *а* — отпечаток нормальной контрастности, *б* — высококонтрастный отпечаток (ЭНМ, 1967 г.)

Воздушная перспектива связана с изменением тона предмета, находящегося на различном расстоянии. Более светлые тона, как правило, ассоциируются с более удаленными предметами, а более темные тона — с расположенными ближе к переднему плану. Частично этот эффект можно объяснить светлым тоном неба и более темным тоном земли, которые ассоциируются с пейзажем. Воздушная перспектива может создаваться наличием дымки, которая приводит к неясности изображения удаленных объектов, что также является причиной их кажущейся светлой тональности. Представленная на рис. 3.22 фотография Аппалачских гор демонстрирует, как воздушная перспектива усиливает восприятие глубины пространства. Глаза наблюдателя при рассматривании снимка последовательно «сканируют» сюжет, переходя от

одного участка к другому. В каждый момент времени некоторая часть снимка будет резкой, а остальная — размытой. Например, если зритель внимательно изучает что-либо на среднем плане, то близкие и дальние объекты будут игнорироваться. Причем неважно, будут ли эти объекты на снимке в фокусе сетчатки глаза или нет. В любом случае создаваемое ими впечатление будет аналогично впечатлению, создаваемому несфокусированными объектами. Это различие в кажущейся резкости подкрепляет осознание того, что разные участки сюжета расположены на разных расстояниях.

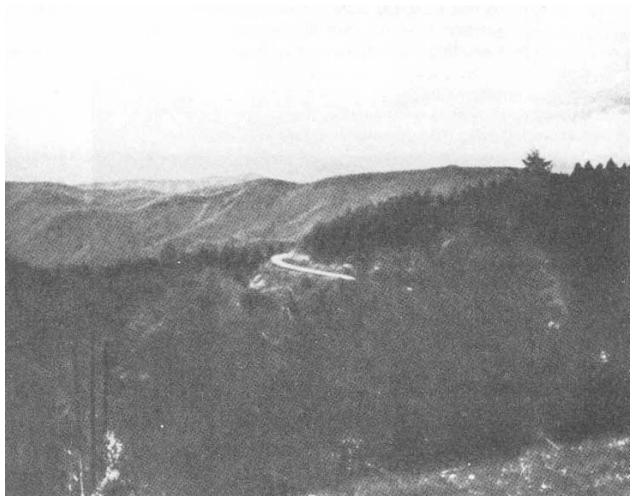


Рис. 3.21.  
Швейцарские  
школьники на  
каникулах  
(ЭНМ 1970 г.)



Рис. 3.22.  
Пейзаж с  
горной цепью  
Аппалачи  
(ЭНМ 1971 г.)

Рис. 3.23.

Размытый фон усиливает впечатление  
перспективы (ЭНМ, 1983 г.)

Поэтому для усиления выражения  
перспективы следует отказаться от  
резкого изображения всех объектов  
снимка. Семейный портрет на рис. 3  
23, б с дефокусированным задним  
планом дает большее выражение  
глубины, чем снимок на рис. 3.23, а.  
Более подробно о факторах, влияющих  
на резкость изображения, см. в гл 8.

Восприятие расстояния и  
масштабности может быть усилено

хорошо знакомыми объектами, расположеными по всему  
пространству кадра. Кажущиеся крошечными по сравнению с  
фигурами двух прогуливающихся людей дома (рис. 3.24)  
помогают наблюдателю понять, что расстояние от точки съемки  
до поселка очень велико. Расстояние и масштаб можно менять с  
помощью линии горизонта. Если линию горизонта расположить в  
верхней части снимка, как, например, на рис. 3.24, то акцент  
делается на окружающем ландшафте. Если линию горизонта  
расположить в нижней части снимка, как на рис. 3.25, то будет  
подчеркиваться небо. Если линию вообще не включать в снимок,  
как на рис. 3.26, то создается впечатление ограниченности  
пространства, хотя расстояние явно велико, на что указывает  
кажущаяся разница размеров домов на снимке. Одним из  
факторов, управляющих расстоянием и масштабом, может быть  
также выбор фокусного расстояния объектива. Если расстояние, с  
которого рассматривается фотоснимок, и его размеры не  
меняются, то снимки, полученные с помощью длиннофокусного

объектива, будут казаться сжатыми в глубину и  
ограниченными по охвату, и наоборот в случае  
использования короткофокусного объектива (более  
подробно вопросы *перспективы* изложены в гл. 5).

Рис. 3.26.  
Вид из кабины фуникулера, Швейцария (ЭНМ, 1970 г.)



Рис. 3.24.

По дороге в поселок, Швейцария (ЭНМ, 1970 г.)

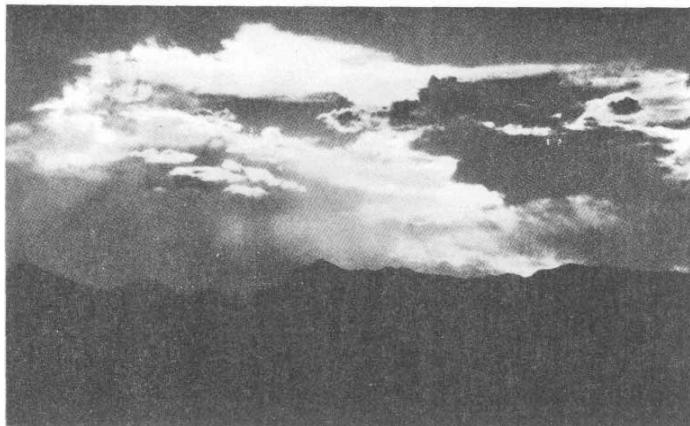


Рис. 3.25.

Горы после грозы (ЭНМ, 1971 г.)

Фотоснимок горы Вашингтона и озера Виннипесоки (рис. 3.27,а), полученный с помощью малоформатного однообъективного зеркального фотоаппарата с 135-мм телеобъективом, на первый взгляд демонстрирует значительные глубины пространства и *поле изображения*. Это впечатление пропадает при его сравнении со снимком (рис. 3.27,б), полученным с помощью того же самого фотоаппарата с 28-мм *широкоугольным объективом* при

неизменной точке съемки. Часть фотографии на рис. 3.27,б, представляющая собой снимок на рис. 3.27,а, выделена прямоугольной рамкой. Большее впечатление масштабности достигается с увеличением глубины поля изображаемого пространства широкоугольного объектива по сравнению с полем изображения телеобъектива, хотя последнее также способствует усилению глубины пространства. Угол поля изображения (гл. 5) 28-мм объектива приблизительно в четыре раза больше, чем 135-мм объектива (угол зрения человека составляет около  $180^\circ$ , что примерно в 2,5 раза больше, чем у 28-мм объектива). Только объективы типа «рыбий глаз» способны отображать расширенное пространство так, как его наблюдает человек.

Отметим, что съемка с помощью широкоугольного объектива приводит к чересчур подробному воспроизведению деталей (рис. 3.27,б). Для большинства ситуаций стандартный объектив с фокусным расстоянием около 50 мм представляет собой удовлетворительный компромисс между теле- и широкоугольным объективами. В качестве примера, подтверждающего сказанное, можно привести снимки гор на перевале Голубого хребта (рис. 3.28), полученные с одной и той же точки с помощью 55-, 135- и 28-мм объективов и малоформатной однообъективной зеркальной фотокамеры.



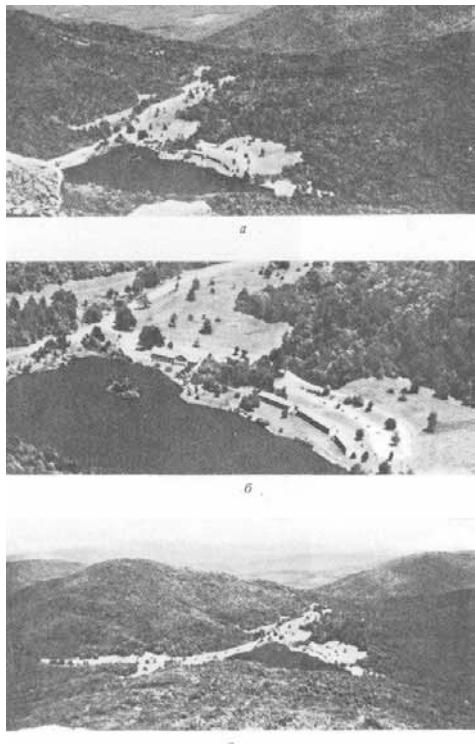
Фотография фиксирует события, происходящие в определенный момент времени, и движущиеся предметы на ней кажутся неподвижными. Поэтому очень важно передать статичным снимком ощущение действия и движения. Впечатление движения может быть достигнуто, если использовать относительно длительную экспозицию, что приводит к размытости изображения движущегося предмета (рис. 3.29,а). Если же изображение должно быть относительно резким, то можно в момент фотографирования перемещать фотокамеру вслед за предметом<sup>1)</sup>). При этом если выбрана относительно длительная экспозиция, то в результате получится смазанность фона (рис. 3.29,б). Тем не менее размытость изображения не всегда является необходимой для достижения ощущения движения. Например, в случае рис. 3.30 ощущение динамики появляется в большей степени благодаря позе женщины и ее развевающейся одежде.

Рис. 3.27.

Гора Вашингтона и озеро Виннипесоки, вид с горы Гансток. Съемка велась с помощью телеобъектива (а) и широкоугольного объектива (б) (ЭНМ, 1967 г.).



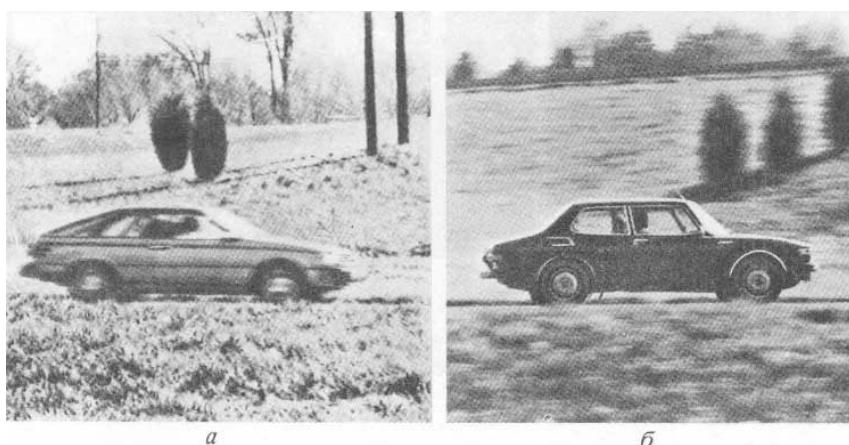
1) Этот способ фотографирования часто называют съемкой «проводкой». — Прим. перев.



**Рис. 3.28.**

Горы О Лоджа, шт. Виргиния Съемка велась с помощью объективов, фокусное расстояние которых составляло (мм) *a* — 55, *b* — 135, *c* — 28 (ЭНМ, 1977 г.)

Автор снимка передал ощущение движения, сняв кадр в правильно выбранное мгновение. Хотя направление взгляда движущегося человека может казаться второстепенным фактором, в некоторых случаях возможно изменение ощущения движения на снимке. На рис. 3.31 спортсмен вначале смотрит вперед по ходу движения, а затем оглядывается назад. По сравнению со вторым снимком, первый выражает большее ощущение движения или по крайней мере устремление спортсмена вперед.



**Рис. 3.29.**

Достижение ощущения движения при замедленной выдержке (ЭНМ, 1983 г.).

Эстетическая сторона восприятия практически всех фотоснимков значительно улучшается, если они обладают одним центром композиции, на который сделано смысловое ударение. Не рекомендуется смысловой центр композиции располагать в центре снимка или на одном из его краев.



**Рис. 3.30.**

Фото Ж. Лартигью «На прогулке в Булонском лесу» (1911 г.). Коллекция Музея современного искусства, Нью-Йорк.

Чтобы понять, как правильно располагать смысловой центр, можно рекомендовать правило деления снимка на три части. Правило гласит, что центр композиции должен располагаться в одной из четырех точек пересечения воображаемых горизонтальных и вертикальных линий, разделяющих кадр на три равные части по обоим направлениям (рис. 3.32). Хотя это правило не выполняется почти так же часто, как и выполняется, оно рекомендует фотографу не делать снимков строго симметричных или асимметричных.

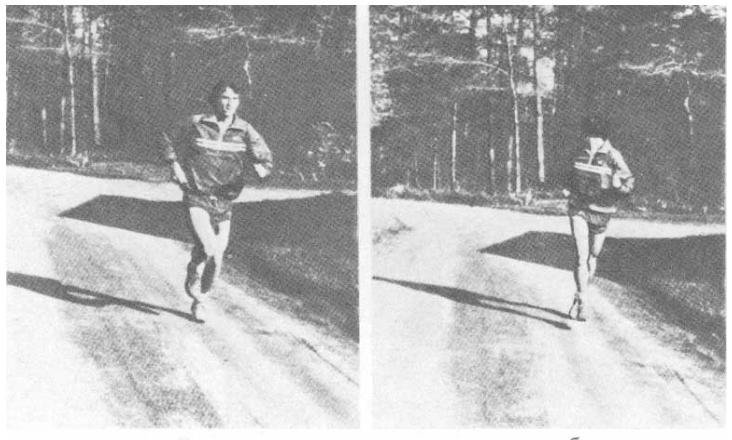


Рис. 3.31.

Фотографии бегущего спортсмена, когда он смотрит вперед (a) и когда повернулся головой назад (b) (ЭВМ, 1983 г.)

Положение пика Маттера на рис. 3.33 иллюстрирует рассмотренное правило. Кроме того, расположение дороги к деревне и облаков указывает зрителю на смысловой центр снимка. Близлежащие горы являются удачным обрамлением снимка, а дома деревни — частью целого и второстепенным элементом по отношению к смысловому центру. Размещение фигуры человека на краю кадра при

съемке пейзажа представляет собой простой способ обеспечения центра съемки и масштаба одновременно. Если хотят подчеркнуть значимость пейзажа, то человек должен смотреть в глубь пейзажа (рис. 3.34, a); если же человек смотрит в фотокамеру (рис. 3.34, б), то значимость пейзажа в кадре снижается, и он становится оправданным задним фоном при портретировании.

Если на снимке присутствуют вертикальные или горизонтальные линии, то снимок часто дает ощущение стабильности. С другой стороны, диагональные линии приводят к обратному эффекту. Диагональная линия, образованная обнаженной скалой, усиливает чувство рискованного положения девушки на рис. 3.35.

Рис. 3.32. Построение композиции фотоснимка с использованием правила деления снимка на три части.

Иногда фотограф включает в кадр снимаемый предмет таким образом, что ориентация фотокамеры относительно окружающего пейзажа не имеет решающего значения. Например, останки старой шхуны на мысе Гаттерас настолько приковывают к себе внимание, что полностью игнорируется наклонная линия горизонта, которая может подразумевать «текущее» морской воды в правую сторону снимка (рис. 3.36).

Рис. 3.33.

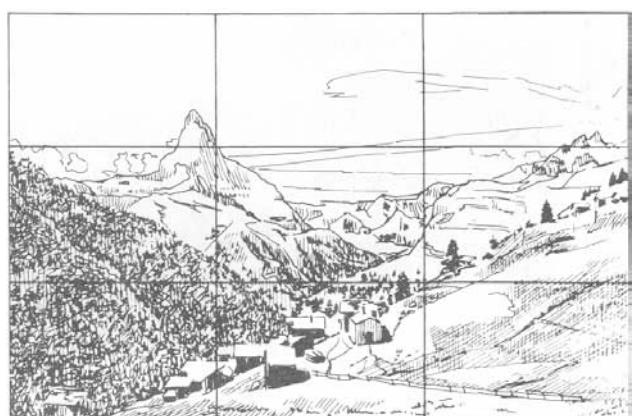
Пик Маттера. Швейцария (ЭНМ, 1970 г.).

Наклонность линии горизонта океана и плоский среднезападный равнинный пейзаж без выраженных горизонталей в большинстве случаев создают впечатление тревоги. Аналогичные проблемы возникают при включении в кадр наклонных пола и потолка, за исключением тех случаев, когда фотограф специально пытается достичь эффекта нестабильности.

Рис. 3.34.

Фигура девушки на фоне Голубых гор, шт. Северная Каролина (ЭНМ 1973 г.)

Многократное повторение модели на снимке может помочь выражению чувства ритма, как, например, на рис. 3.37. Фотомонтаж лица поэта, по-видимому, очень удачен для иллюстрации ритма.





a



b

Рис. 3.35.

Вид на гряду Голубых гор шт. Северная Каролина (ЭНМ, 1971 г.)

Большинство зрителей видят все предметы в цвете, но черно-белый снимок получается в белом, различных оттенках серого и черном цветах. На рис. 3.20 приведены снимки, показывающие, как можно управлять контрастом для изменения настроения картины. В гл. 9 будут подробно излагаться различные методы изменения передачи тонов определенного предмета. Фотограф

должен представлять себе, как сцена, которую он видит в цвете, будет выглядеть в черно-белой интерпретации. Это может значительно повлиять на композицию снимка. Например,

Рис. 3.36.

Останки старой шхуны на мысе Гаттерас, шт. Северная Каролина (ЭНМ, 1968 г.)

относительное расположение светлых и темных тонов может изменить ощущение стабильности снимка.

Если снимок темный внизу и светлый вверху, то он обычно создает ощущение стабильности. Если же расположение тонов противоположно, то эффект будет обратным. Например, снимок пика Маттера на рис. 3.33 обычно создает чувство относительной стабильности, в то время как снимок горной долины на рис. 3.26, возможно, создает чувство нестабильности. Многие факторы влияют на такие ощущения, а относительное расположение светлых и темных тонов на этих двух снимках, без сомнения, является одним из подобных факторов.

Рис. 3.37.

Фотомонтаж Э Стейхена «К Сандерберг» (1936 г.) Музей современного искусства, Нью-Йорк

В предыдущем разделе отмечалось, что фотограф должен видеть объект так, как он будет снят фотокамерой. Одни и те же повторяющиеся действия фотографа в конце концов становятся почти автоматическими, в то время как творческие проблемы возникают каждый раз заново, и поэтому, прежде чем нажать спуск затвора, фотограф должен все тщательно обдумать. Сознание и глаза фотографа должны быть натренированы



таким образом, чтобы контролировать задний план, обрамление сцены, освещение, выгодную позицию, выдержку и т. д. После того как предмет снят на фотопленку, имеется возможность проделать ряд операций в фотолаборатории, которые могут внести изменения в характер конечного отпечатка. К ним относятся изменения процесса проявления пленки, фотопечати и кадрирования. Весьма заманчиво, управляя этими операциями, компенсировать ошибки, допущенные при fotosъемке. Однако лучшие снимки обычно получаются тогда, когда пленка подвергается стандартной фотообработке и печати. Иногда не может быть получен удовлетворительный снимок выбранного объекта при складывающихся обстоятельствах. Тогда лучше вообще не снимать. Фотограф должен знать ограничения и возможности обстановки; для

этого он должен внимательно изучать работу мастеров фотографии.

### Фотопортрет

Наиболее интересными и разнообразными объектами для фотосъемки являются лица людей. Как правило, люди проявляют значительный интерес к тому, как они выглядят, и, кроме того, большинство интересуются портретами других людей. Этот интерес может ограничиваться семьей, друзьями и знаменитостями, а может быть и более широким.

Фотографировать людей — весьма трудное занятие, поскольку фотограф должен или тщательно изучить модель, или действовать так, чтобы его присутствие не было заметным. Часто бывает полезно, чтобы фотографируемый человек занимался каким-нибудь делом, что снимает скованность, вызванную присутствием фотографа. Хорошее владение аппаратурой и создание у фотографируемого впечатления технической компетентности помогают проводить съемку людей, ведущих себя спокойно; съемка людей, находящихся в напряжении, обычно не дает удовлетворительных результатов. Хороший портрет должен раскрывать перед зрителем характер человека, своеобразие личности, чувства, которые он испытывает в момент съемки, общественное положение, образ жизни и (или) род занятий. Полностью изображенное лицо может передать все эти сведения, но в обычных портретах глаза показывают больше, чем все лицо. Поэтому, если нет специальных причин поступать иначе, глаза фотографируемого должны быть хорошо видны на снимке.



Рис. 3.38.

Фото Ю Карша «Портрет М Андерсон» (1945 г) Copyright ©Yousuf Karsh, Ottawa / Woodfin Camp.

Портретный жанр в фотографии удобно делить на три группы: *официальный, неофициальный и детективный*<sup>1)</sup>. Деление на группы условно, но весьма полезно при классификации портретов. Официальный портрет раскрывает исключительно индивидуальные черты лица. Обычно здесь применяется довольно стандартное освещение (обсудим позже), а что касается различного реквизита, то он практически не используется. Например, желательны простота в одежде, минимум украшений, а также полное отсутствие окружающих предметов. Как правило, такие портреты снимаются в фотостудии с использованием заднего фона. На портрете обычно показывают только голову и плечи модели (рис. 3.38). Тем не менее встречаются и исключения из правил композиции. Например, студийный снимок невесты во весь рост на простом заднем фоне — это чисто официальный снимок.

С другой стороны, в неофициальном портрете часто используют реквизит, необычное освещение и (или) окружающие предметы для того, чтобы рассказать о модели или подчеркнуть ее особенности.

1) В фотографической литературе чаще встречается деление на поставленный (студийный, павильонный) портрет и на репортажный, сохраняющий всю психологическую глубину портретного жанра, действенность фотопортрета —*Прим. Ред.*

Рис. 3.39.

Фото Дж. Дейтер «Дж Голдштейн в своей кухне» (1969 г) Copyright © Judy Dater, 1969  
На рис 3.39 кухонная обстановка, положение рук, платье и даже поза частично раскрывают образ жизни модели.

Следует отметить, что еще в 1921 г А. Стиглиц использовал фон, положение рук и одежду, чтобы достичь подобного эффекта (см рис 3.4). Уже более 50 лет основные приемы портретной съемки практически не менялись.

Рис. 3.40.

Фото В.Ю Смита «Портрет доктора Цериани» (1948 г) Copyright © W Eugene Smith 1949



При создании детективного, (документального) портрета, который по своему характеру противоположен официальному и неофициальному портретам, позирование не используется. Обычно модель фотографируется в процессе выполнения какой-нибудь работы. Снимок врача, оказывающего помощь раненому ребенку, на рис. 3.40 представляет пример такой фотографии. Напряжение в глазах врача усиливается

видом раненого ребенка. Следует сказать, что мастерство фотографа хорошо проявились в этом детективном портрете. Обычно, даже хорошо отрепетированный (поставленный) портрет легко отличим. Можно утверждать, что хороший детективный портрет представляет собой пример удачного репортажного снимка, который может быть сделан лишь случайно. Однако хорошая детективная фотография является не только делом случая. Фотограф должен обладать чувством предвидения и интуицией для правильного определения момента съемки. К детективным портреам относятся и такие, когда модель совершенно не подозревает о присутствии фотографа.

#### Модель и поза

В этом разделе мы не будем подробно останавливаться на всевозможных способах постановочной съемки, а рассмотрим только основные правила. Обычно не рекомендуется, чтобы фотографируемый смотрел прямо в объектив, а плечи располагал перпендикулярно к фотокамере. Такая поза может быть необходима для идентификационных снимков, например для паспорта, и обычно приводит к статичному характеру снимка (рис. 3.41). В некоторых случаях можно рекомендовать пользоваться этой позой для усиления чувства статического напряжения и непреклонности, как на снимке Дж. Моргана (рис. 3.42). Модель может смотреть или в фотокамеру (рис. 3.43), или мимо нее (рис. 3.44).

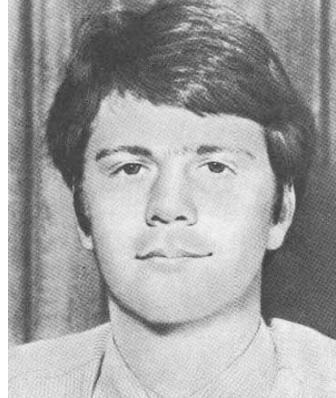
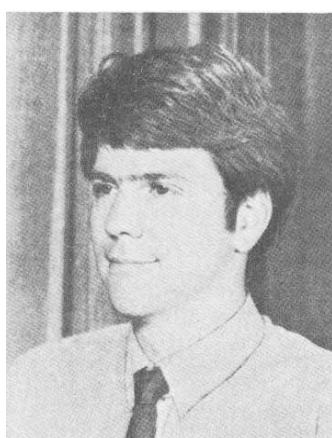
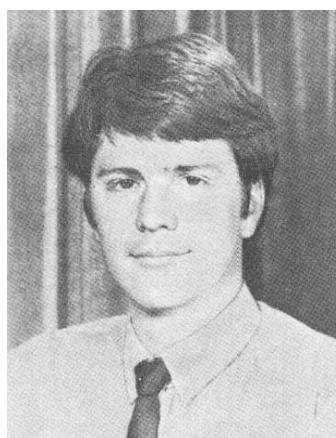


Рис. 3.41.  
Фотография для документов (ЭНМ, 1983 г.)

Рис. 3.42.  
Фото Э. Стейхена «Портрет Дж. Моргана» (1903 г.)  
Музей искусств Метрополитен Коллекция А. Стиглица, 1949 г.

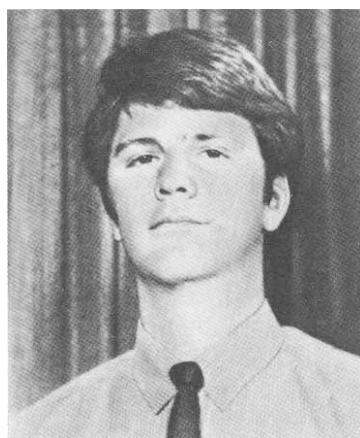
В первом случае возникает большее чувство близости между зрителем и моделью. Степень отвлеченности выражения лица зависит от направления взгляда, а также от того, насколько далеко от фотокамеры находится человек. Различные



черты лица и степень их подчеркивания также являются факторами, определяющими, какое впечатление производит модель. Для того чтобы уменьшить неблагоприятное впечатление от выступающих ушей, фотографируемый должен повернуть голову и смотреть мимо камеры. При этом

Рис. 3.43.  
Взгляд, направленный в объектив усиливает чувство общения со зрителем (ЭНМ 1983 г.)

Рис. 3.44.  
Взгляд, направленный мимо объектива, ослабляет чувство общения (ЭНМ, 1983 г.)



одно ухо будет спрятано за головой, а другое не будет казаться выступающим. С этой целью также можно менять освещение. При съемке малоформатной фотокамерой со стандартным объективом предпочтительно фотографировать модель с очень близкого расстояния, чтобы в кадр включить только голову и плечи. Тем более, что в этом случае нет необходимости значительно увеличивать фотоснимок при печати для получения отпечатка требуемого размера.

Рис. 3.45.  
Камера, направленная снизу вверх, создает чувство превосходства снимаемого над зрителем (ЭНМ, 1983 г.)

Если фотокамера находится слишком близко от модели, то близлежащие части лица, например нос, будут казаться чересчур большими по сравнению с размерами удаленных частей, например ушей (см. рис. 5.17). Если по каким-либо причинам надо снимать на расстоянии, меньшем

оптимального (около 2 м при создании портрета со съемкой верхней части фигуры), то плечи должны быть приблизительно перпендикулярны к оси фотоаппарата. Если же это не выполняется, то ближайшее плечо, как только что объяснялось, получится на снимке слишком большим. Весьма полезно в практике фотопортрета использовать длиннофокусные объективы. Например, объектив с фокусным расстоянием 100 мм является наилучшим вариантом для малоформатного фотоаппарата при создании портрета. Чтобы изменить построение снимка, можно использовать вертикальное по отношению к модели расположение фотокамеры. Установка фотокамеры на уровне глаз обычно приводит к усилению ощущения близости между моделью и зрителем. Если камера расположена значительно ниже уровня глаз, то зритель, вероятно, будет воспринимать модель как авторитетную, влиятельную личность (рис 345). И наоборот, при съемке сверху зритель будет доминировать над моделью. Кроме того, съемка с верхней точки может быть использована для изменения перспективы лица. Более подробно техника портретной съемки рассмотрена в книге, изданной фирмой Eastman Kodak Company<sup>1</sup>).

### **Освещение модели при портретной съемке**

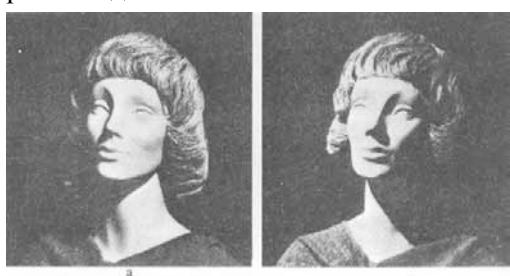
Фотографируемая модель может освещаться либо любыми имеющимися в распоряжении фотографа источниками света, либо студийными осветительными приборами. Вполне приемлем прямой свет солнца, ясного неба, окон, а также свет ламп накаливания и «дневного света». К осветительным приборам, используемым профессиональными фотографами, относятся прожектора направленного и заполняющего света, электронные вспышки и лампы-вспышки. Можно также воспользоваться различными экранами, зонтами и другими белыми отражающими поверхностями для усиления любого источника благодаря отражению его света. Для большинства ситуаций перекальные фотолампы являются наиболее удобными в употреблении. Прямой солнечный свет также является вполне подходящим, хотя надо учитывать, что в большинстве случаев солнце находится высоко над горизонтом, и поэтому солнечный свет, если не пользоваться дополнительным рефлектором, может вызывать образование нежелательных глубоких теней на лице (под глазами, носом и подбородком). И даже применяя рефлектор, модель надо располагать так, чтобы солнце не светило прямо на нее. Использование открытого неба (гл. 2) в качестве источника света может приводить к хорошим результатам, но при отсутствии дополнительных рефлекторов тени, которые помогают достичь рельефности лица, фактически отсутствуют и фотоснимок будет получаться мягким или плоским.

<sup>1)</sup> Professional Portrait Techniques, Rochester, N Y Eastman Kodak Company, 1980

И даже с таким освещением было получено много хороших портретов. Импульсное освещение обладает всеми преимуществами портативного оборудования и, будучи мгновенным освещением, приводит к уменьшению вероятности снять человека прищурившимся. Однако в отсутствие дублирующего<sup>1)</sup> света неопытному фотографу довольно трудно мысленно представить себе снимок. Импульсное осветительное устройство, установленное непосредственно на фотокамере, создает такое освещение, что лицо фотографируемого человека получается плоским, особенно если он смотрит прямо в фотокамеру. В случае цветной фотографии именно при таком сочетании освещения и положения модели импульсное освещение приводит к тому, что зрачок глаза на фотоснимке кажется красным. Этот эффект объясняется тем, что сетчатка глаза освещается импульсной лампой и ее изображение проецируется на фотопленку через зрачок.

Если фотограф хочет получить оптимальное освещение, то для этого имеются различные напольные и настольные осветительные установки без светорассеивателей. Однако обеспечиваемая ими яркость света ограничена, и поэтому приходится использовать длительные выдержки и (или) большие значения диафрагмы. Например, две обычные открытые лампы накаливания мощностью 150 Вт каждая, расположенные приблизительно на расстоянии 2 м от модели, требуют экспозиции 1/60 с при диафрагме 2,8 для фотопленки светочувствительностью ASA 400. Такая экспозиция несколько ограничивает глубину резко изображаемого пространства (гл. 4). Большие диафрагменные числа, обеспечивающие большую глубину резкости, требуют более длительной выдержки, увеличивая вероятность того, что за время экспонирования человек может сдвинуться. Такие увеличенные экспозиции приводят к необходимости использования различного типа штативов для фотокамеры. Отметим, что качество павильонных фотопортретов значительно улучшается при установке фотокамеры на штатив.

При обсуждении различных вариантов установки источников света для портретной съемки не будем касаться вопросов их устройства. Для обеспечения достаточного освещения можно рекомендовать пять или шесть источников света. В портретном освещении первая установка света называется основным или *ключевым*<sup>2)</sup> светом (key light). Затем следует установка *заполняющего света* (fill light), который подсвечивает тени, образованные основным светом. Кроме того, используют *фоновый свет* (background light) для освещения фона, а также *контровое освещение* (hair light) для создания бликов света на волосах.



<sup>1)</sup> Для того чтобы можно было оценить характер освещения, создаваемого импульсным источником света, часто используют дополнительное световое устройство с лампой накаливания, устанавливаемое рядом со вспышкой Свет, создаваемый этим вспомогательным устройством, называется дублирующим — *Прим. Перев.*

<sup>2)</sup> В советской литературе основной свет чаще называется рисующим (реже ведущим) светом — *Прим. Перев.*

Рис. 3.46.

Различные случаи освещения лица направленным светом *a* — преобладает освещаемая часть, *b* — значительная часть лица в тени, *c* — при фронтальном освещении возникает эффект «бабочки»

И наконец, *моделирующий свет* (kicker light) применяют для акцентирования отдельных участков лица и костюма.

Обычно источник основного света устанавливается в одной из трех следующих позиций. Если этот свет попадает на ближайшую к фотокамере сторону лица, то такое освещение называется *широким* (broad) *переднебоковым освещением* (рис. 3.46,д). Если основным светом освещена дальняя от камеры сторона лица, то такое освещение называется *узким* (short) *переднебоковым освещением* (рис. 3.46,5).

Если модель смотрит в направлении фотокамеры, то оба случая становятся эквивалентными. Если источник основного света расположен таким образом, что обе части лица освещаются одинаково, то такое освещение называется *фронтальным* [в оригинале butterfly (бабочка)] (рис. 3.46,в). Такое освещение создает впечатление более узкого лица, чем при переднебоковом освещении.

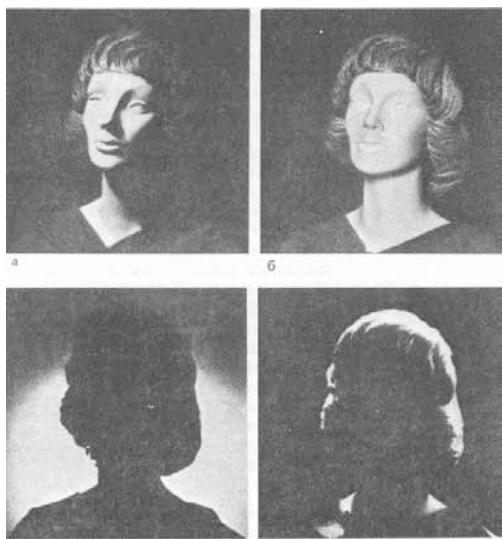
Для переднебокового освещения источник основного света обычно располагают приблизительно под углом 45° по отношению к оптической оси объектива. В случае фронтального освещения положение осветительного устройства определяется положением лица. Как правило, источник основного света располагается выше головы модели, а точная высота определяется в зависимости от строения лица.

Рис. 3.47.

Различные виды освещения при портретной съемке *a* — основной (рисующий) свет, *b* — заполняющий свет *c* — освещение фона, *d* — контровый (или контурный) свет освещивающий волосы и плечи  
Воспроизведется с разрешения фирмы Eastman Kodak Company

Глубоко посаженные глаза и резкие черты лица будут скрадываться при низком расположении источника основного света. Если имеется только один источник света, то обычно выбирают фронтальное освещение или его варианты

Второе осветительное устройство создает заполняющий свет, который подсвечивает тени, вызванные основным светом. Обычно его помещают рядом с фотокамерой с противоположной от источника основного света стороны и немного ниже его. Как правило, мощность источника заполняющего света в два раза меньше, чем у источника основного света. Обычно либо пользуются лампой в два раза меньшей мощности, чем у лампы основного света, либо устанавливают осветитель на большее расстояние от модели. Необходимый баланс между основным и заполняющим светом можно определить визуально. Соотношение освещенностей подробно обсуждается в гл. 10. Эффекты освещения одним источником, дающим основные виды



света, проиллюстрированы на рис 3.47. В случае определения экспозиции экспонометром замеры должны быть сделаны при включенных источниках основного и заполняющего света.

Фоновый свет применяется для освещения фона. Это освещение весьма желательно при съемке модели с темными волосами на темном фоне, поскольку в противном случае трудно различить контур головы. Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 3.47в. Иногда фоновый свет используют для подсветки теней на светлом фоне, вызываемых основным и заполняющим светом. Если отказываются от использования фонового света, то нежелательные тени на фоне в некоторых случаях могут быть устраниены посредством более высокой установки источника основного света и расположения модели на большем расстоянии от фона.

Контровый свет используется для создания световых бликов на контуре головы, и обычно источник этого света располагается выше и позади модели. Источниками основного, заполняющего и фонового света в большинстве случаев являются лампы накаливания, дающие рассеянный свет (например, перекальные фотолампы), в то время как для контрового света необходимо использовать световые приборы, дающие направленный свет (например, прожекторы). На рис. 3.47г показан пример использования контрового света. В некоторых случаях используется акцентирующий свет, называемый моделирующим, для выделения определенных участков лица. Иногда используется дополнительный узкий направленный свет (kickers) для акцентирования сюжетно-важных деталей, дополнительной обработки объемной формы (см. сноску на с. 88).

### Упражнения

1. Рассмотрите снимки, приведенные в гл. 3. Какие из них вы считаете фотографиями типа «зеркало» и «окно»?
  2. Расскажите о способах создания перспективы на фотографии.
  3. Выберите в этой главе пять фотографий и найдите лишние элементы на них.
  4. Определите замысел отобранных вами фотографий. Для каких категорий зрителей они предназначены?
  5. Сравните способы, с помощью которых глаз и фотокамера «видят» снимаемый объект.
  6. Какими способами добиваются впечатления пространства и масштабности в фотографиях этой главы?
  7. Какие снимки этой главы передают ощущение движения, а какие — статичности?
  8. Рассмотрите различия между официальным, неофициальным и детективным портретами.
- Классифицируйте портреты в данной главе согласно этим категориям.
9. Рассмотрите относительное положение модели и фотокамеры в поставленном портрете. Какое имеет значение высота установки фотокамеры, направление взгляда и положение модели?
  10. Нарисуйте схему, показывающую положения двух осветительных приборов, фотокамеры и модели для обеспечения переднебокового освещения при съемке портрета.

## Часть 2. Фотографическая оптика

### Глава 4. Свет и оптические линзы

В гл. 2 были рассмотрены основные вопросы оптики. Однако для получения хороших снимков необходимо углубленное знание законов оптики и распространения света. В этой главе рассматриваются основные законы распространения света и оптические линзы, а в следующей — использование оптики в фотографии.

#### Свет

Для описания физических явлений часто используются различные модели. Например, свет можно считать прямолинейным лучом. Визуально он может быть представлен в виде узкого пучка солнечного света, проходящего через малое отверстие в непрозрачном экране внутри полностью затемненной комнаты. Пучок света рассеивается на частицах пыли воздуха, что делает путь света видимым. С помощью этой, первой, модели света можно объяснить большинство фотографических явлений. Позже были предложены другие, более сложные модели света. Свету стали приписывать волновую природу, распространение в виде волны, подобно тому, как распространяется волна по поверхности стоячей воды, если в нее бросить камень. И наконец, чтобы объяснить поведение света на микроскопическом уровне, необходимо представить свет в виде малых порций энергии. Последняя (квантовая) модель позволяет описать большинство оптических явлений, включая те, которые объясняются геометрической и волновой моделями, хотя эти объяснения часто достаточно сложны.

При описании световых и оптических явлений, относящихся к фотографии, будут использованы все три модели. Для объяснения конкретного явления будем применять простейшую модель. Вероятно, это короткое объяснение поможет читателю уяснить смысл вопроса «что такое свет?». Концепция светового луча основывается на двух законах, которые описывают изменение направления распространения света при пересечении границы между двумя различными оптическими средами (например, границы раздела между воздухом и стеклом). Предположим, что свет падает на границу раздела воздух—стекло под углом  $i$  относительно нормали к поверхности (рис. 4.1). Некоторая часть света будет отражаться от поверхности под углом  $r$  относительно нормали, тогда как другая часть будет проходить через границу раздела и будет преломляться под углом  $Q$  к нормали. Закон отражения утверждает, что  $i = r$  (41)

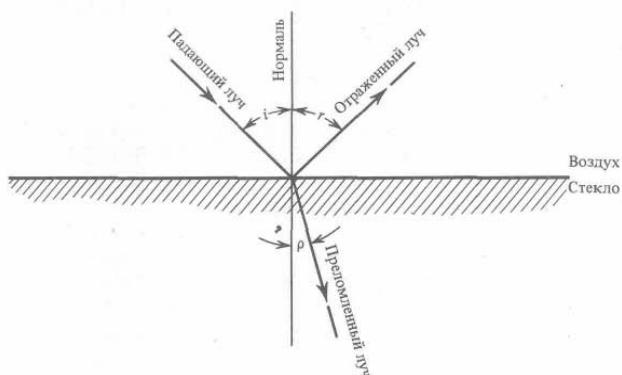


Рис. 4.1.

Отражение и преломление света на границе раздела воздух — стекло

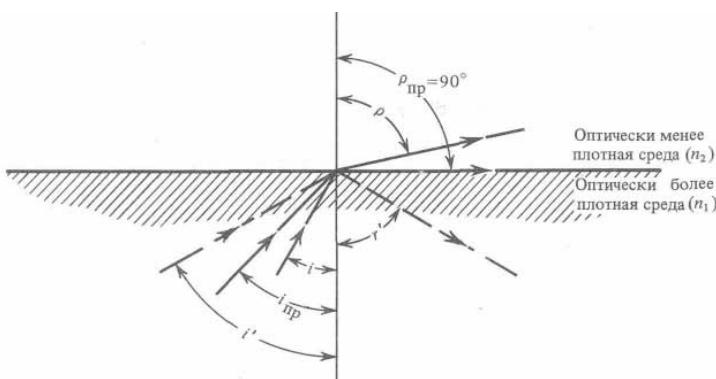
Этот закон, выраженный словами, гласит, что угол падения равен углу отражения. Часть падающего света всегда будет отражаться. Закон преломления записывается в виде

$$n_{\text{в}} \sin i = n_{\text{ст}} \sin Q, \quad (42)$$

где  $n_{\text{в}}$  и  $n_{\text{ст}}$  — показатели преломления воздуха и стекла соответственно. Значение  $n_{\text{в}}$  приблизительно равно единице, а  $n_{\text{ст}}$  составляет около 1,5. Физический смысл показателя преломления будет понятным в дальнейшем при рассмотрении света с

волновой точки зрения.

Функция синус (sm) — тригонометрическая функция, которая постепенно увеличивается с ростом угла от 0 до  $90^\circ$ , а ее значения изменяются от 0 (при  $z = 0^\circ$ ) до 1 (при  $i = 90^\circ$ ). Воздух, как уже указывалось, имеет меньшую оптическую плотность, чем стекло. Закон преломления света можно сформулировать следующим образом: если луч света переходит из оптически менее плотной среды (в нашем случае воздух) в среду с большей оптической плотностью (стекло) с углом падения относительно нормали, отличным от нуля, то луч будет отклоняться в сторону нормали к поверхности. Если луч проходит в обратном направлении из оптически более плотной среды в менее плотную, то он будет отклоняться от вертикали. Если же угол  $i = 0$ , то луч вообще не будет отклоняться. Закон (4.2) может быть обобщен заменой показателей преломления воздуха и стекла на показатели преломления соответствующих сред.



При определенных условиях свет, распространяющийся из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, полностью отразится от границы раздела, т. е. в менее плотную среду свет не будет попадать. В этом случае увеличение угла падения  $i$  (рис. 4.2) приводит к росту угла преломления  $Q$ , причем  $Q$  всегда больше  $i$ .

Рис. 4.2.

Полное внутреннее отражение света

По мере возрастания  $r$  угол  $Q$  в конце концов становится равным  $90^\circ$ , и свет тогда не переходит границу раздела. Угол падения  $i$  для которого  $Q = 90^\circ$ , называется углом полного внутреннего отражения. Так как  $\sin 90^\circ = 1$ , этот предельный угол может быть найден из уравнения (4.2):  $n_1 \sin i_{\text{пр}} = n_2 \sin 90^\circ = n_2$ . (4.3)

Для углов, превышающих предельный угол ( $i'$  на рис. 4.2), весь свет будет отражаться в первую среду. Это явление называется полным внутренним отражением. Полное внутреннее отражение иногда используется для изготовления специальных высококачественных зеркал, так как нет необходимости покрывать отражающим слоем поверхность зеркала, если угол падения света всегда больше предельного угла.

**Пример 4.1.** Необходимо создать дальномер такого типа, который иногда используется в

фотокамерах (гл. 2). Для этого используем треугольную призму, отражающую нижний луч (рис. 4.3) к верхнему зеркалу. Если угол падения  $i$  равен  $45^\circ$ , то будет ли свет полностью отражаться от поверхности в точке  $R$  при условии, что призма изготовлена из стекла «крон», показатель преломления которого 1,5?

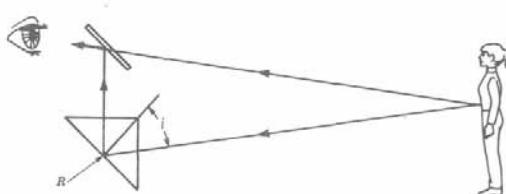


Рис. 4.3.

Принцип действия дальномера.

Если предельный угол меньше  $45^\circ$ , то весь свет будет отражаться. Из уравнения (4.3) получим

$$\sin i_{\text{пр}} = \frac{1}{1,5} = 0,667, \quad i_{\text{пр}} = \arcsin 0,667 = 41,8^\circ. \quad (4.4), (4.5)$$

Свет будет полностью отражаться для углов, больших приблизительно  $42^\circ$ .

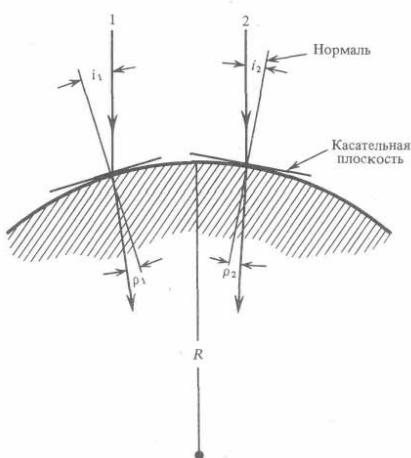


Рис. 4.4

Преломление света на сферической поверхности радиусом  $R$ .

Работа основных деталей оптических устройств, таких, как зеркала и линзы, может быть описана с использованием математических формул, полученных на основе законов преломления и отражения. Однако эти законы должны применяться с осторожностью. Чтобы определить, как преломляется свет на сферической поверхности, необходимо использовать закон преломления, как показано на рис. 4.4. Проведем плоскость, касательную к поверхности стеклянной сферы в точке падения луча, и нормаль, перпендикулярную этой плоскости. Если углы измерять относительно этой нормали, то закон преломления будет иметь вид (4.2).

Параллельные лучи 1 и 2 преломляются по-разному, поскольку углы падения  $i_1$  и  $i_2$  не одинаковы, так как касательные плоскости в точках падения этих лучей не параллельны. Это свойство позволяет с помощью линзы получать изображение.

Хотя геометрическая модель света может быть использована для объяснения простой работы линз, в ряде случаев применение этой модели затруднительно. Например, цвета радуги и разложение белого света в спектр при пропускании его через призму указывают на сложный состав белого света. Было бы весьма сложно, используя простейшую модель, описать появление этих различных цветов. Более того, такие явления, как *интерференция*, *дифракция* и *поляризация* света, вообще невозможно объяснить с точки зрения данной модели.

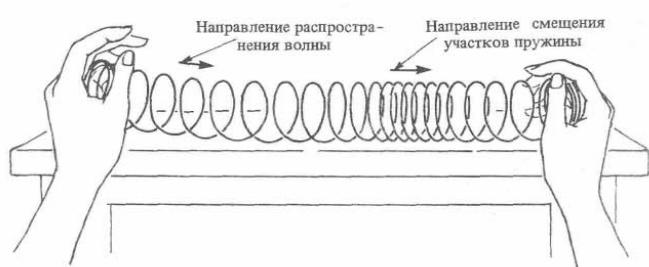


Рис. 4.5.

Пример распространения продольной волны вдоль пружины.

Чтобы преодолеть эти трудности. Гюйгенс, Максвелл и другие исследователи развили волновую модель света. Существуют волны *продольные* и *поперечные*.

Представим себе, что слабая пружина растягивается на столе двумя руками (рис. 4.5). Если одну руку резко сдвинуть по направлению к центру пружины, то она

моментально сожмется около этой руки, и сжатие будет распространяться вдоль пружины до тех пор, пока не достигнет другой руки и не вызовет ее смещения. Это сжатие представляет собой продольную волну, поскольку направления смещения отдельных участков пружины и силы, действующей на руку, совпадают с направлением распространения волны (оси пружины). Звуковые волны в воздухе — также продольные волны.

Предположим, что между двумя людьми протянут шнур и что каждый человек держит его одной рукой (рис. 4.6). Человек, стоящий слева, резко дергает шнур сверху вниз так, чтобы волна вертикального колебания распространялась вдоль шнура. Когда волна достигнет человека, стоящего справа, его рука будет двигаться вертикально. Направление распространения волны горизонтальное, в то время как направление смещения шнура вертикальное и перпендикулярно направлению распространения волны. Такая волна называется поперечной волной. Если человек,

стоящий слева, дергает за шнур горизонтально туда и обратно в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка, то распространяющееся смещение шнура будет горизонтальным, и это также поперечная волна.

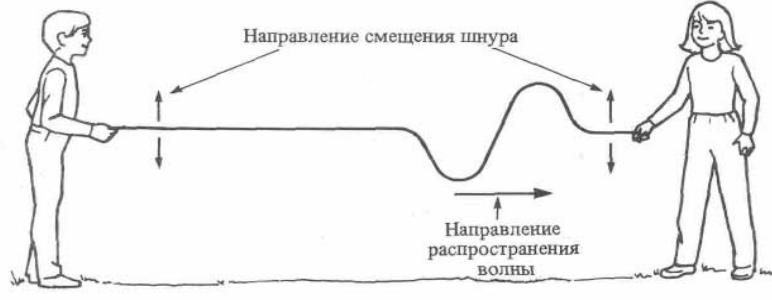


Рис. 4.6.  
Пример поперечной волны

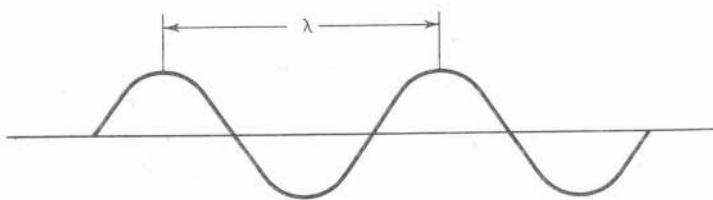


Рис. 4.7.  
Непрерывная (синусоидальная) волна.

Если человек, стоящий слева, совершает рукой круговое движение в плоскости, перпендикулярной натянутому шнруу, то возникнет спиральная волна, которую также

следует рассматривать как поперечную волну, распространяющуюся вдоль шнура. Если колебание в световой волне совершается в одной плоскости, как в первых двух примерах, то получим так называемую *плоскополяризованную волну*. Любая световая волна может быть приведена к двум плоско поляризованным волнам, колебания в которых совершаются во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Свет, излучаемый лампой накаливания, может быть представлен в виде сферических волн, распространяющихся во всех направлениях. Нечто похожее можно увидеть, бросив камень в спокойную воду пруда. Образовавшиеся на поверхности волны расходятся в виде кругов. В отличие от этого сферические световые волны распространяются в свободном пространстве. Если шнур (рис. 4.6) непрерывно раскачивать, то волны будут распространяться в непрерывной последовательности и будут выглядеть, как на рис. 4.7. Подобным образом можно рассматривать и световые волны. Повторяющееся в пространстве расстояние одинаковых «смещений» в световой волне называется *длиной световой волны*  $\lambda$ . Число полных колебаний в данной точке пространства в единицу времени называется *частотой*  $f$ . Частота обычно измеряется числом колебаний в секунду, и единицей измерения частоты является герц (Гц). Световые волны представляют собой лишь малую часть всей шкалы *электромагнитных волн*.



Рис. 4.8.  
Спектр электромагнитных волн

Эти волны имеют сходные электромагнитные характеристики и представляют многие виды излучений. Все электромагнитные волны распространяются с одинаковой скоростью в вакууме, называемой *скоростью света*  $c$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). Скорость,

$$c=f\lambda, \quad (4.6)$$

частота и длина электромагнитной волны связаны соотношением

где/и  $A$ , определены выше. На рис. 4.8 представлен спектр (шкала) электромагнитных волн. Границы между различными участками спектра довольно произвольны, и они частично перекрываются. Весь спектр электромагнитных волн охватывает 20 порядков величины, а видимая часть спектра заключается в интервале 400—700 нм [ $(4 - 7) \cdot 10^{-7}$  м]. Это та часть спектра, которая представляет наибольший интерес для фотографии. Длинные и короткие длины волн соответствуют красной и фиолетовой частям спектра соответственно.

Когда свет проходит через прозрачную среду, отличную от вакуума, его скорость  $c$  уменьшается по сравнению со скоростью света в вакууме и

$$\pi_{cp} = c/c_{dp} \quad (4.7)$$

где  $\pi_c$  — показатель преломления среды. Частота световой волны остается постоянной в любой среде. Как следует из выражения (4.6), длина волны должна уменьшаться, когда свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную. Это уменьшение длины волны объясняет, почему свет преломляется при переходе из одной прозрачной среды в другую (рис. 4.9).

4.9). Скорость света в любой прозрачной среде, за исключением вакуума, зависит от частоты света.

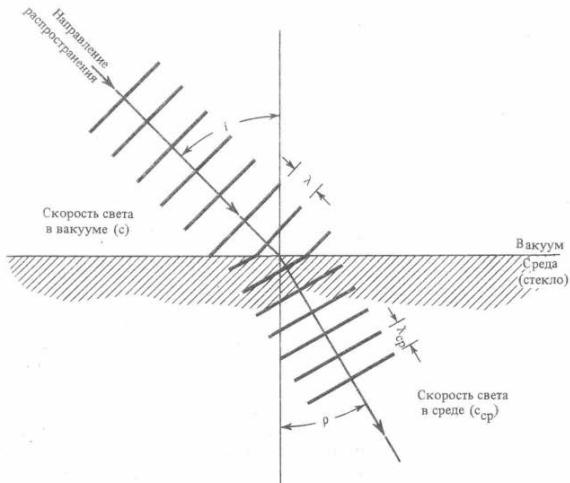
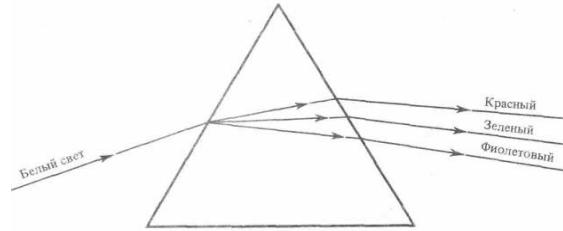


Рис. 4.9.

Преломление света согласно волновой модели.

Рис. 4.10.

Схема разложения белого света в спектр с помощью призмы (дисперсия света).



исключением вакуума, зависит от частоты света.

Вообще, чем выше частота, тем меньше скорость распространения света. Зависимость показателя преломления от частоты (4.7) называется *дисперсией* света. Так как фиолетовый свет распространяется медленнее красного, при переходе через границу раздела он будет преломляться сильнее. Если белый свет пропустить сквозь две поверхности призмы, то он будет разлагаться в спектр (рис. 4.10).

Большинство оптических задач, стоящих перед фотографией, можно объяснить с помощью волновой модели. Однако эта модель не позволяет объяснить взаимодействие света с веществом, в частности действие света на галогениды серебра при образовании фотоизображения. Для этого свет необходимо рассматривать как совокупность элементарных частиц, называемых *фотонами*. Эта модель требует знания квантовой механики. К счастью, нам необходимы только ее основные представления, и поэтому можно избежать изложения квантовой механики. Считается, что каждый фотон обладает энергией

$$E=hf \quad (4.8)$$

Где  $f$  — частота света и  $h$  — постоянная Планка ( $h = 6,6 \times 10^{-34}$  Дж • с). Из формулы (4.8) следует, что фотоны голубого света имеют большую энергию, чем фотоны красного света. Это замечание весьма существенно для объяснения взаимодействия светочувствительных солей серебра со светом различного цвета. Фотоны могут взаимодействовать с отдельными атомами, что и объясняет действие света на светочувствительные материалы.

#### Тонкие линзы

Выше было показано, что лучи света преломляются на границе раздела двух сред, например воздуха и стекла. Объективы фотокамер обычно собираются из стеклянных линз со сферическими поверхностями. Линза, толщина которой в центре больше, чем по краям, называется *собирающей* или *положительной линзой* (рис. 4.11, а), в то время как линза, более толстая на краях, называется *рассеивающей* или *отрицательной* (рис. 4.11, б).

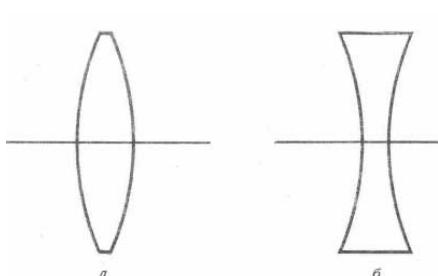


Рис. 4.11.

Положительная (собирающая) (а) и отрицательная (рассеивающая) (б) линзы

Чтобы определить, как линза преломляет лучи света, необходимо воспользоваться законом преломления для каждого луча, падающего на ее поверхность (рис. 4.4). Однако если линза достаточно тонкая, ее работа (в большинстве случаев применения) определяется ее фокусным расстоянием.

Фокусное расстояние было определено в гл. 2 через положение изображения объекта, который находится на большом

расстоянии от линзы. Можно показать, что фокусное расстояние зависит от формы линзы и материала,

из которого она изготовлена. Фокусное расстояние в первом приближении определяется следующим образом:

$$1/f = (n-1)(1/R_1 + 1/R_2), \quad (4.9)$$

где  $n$  — коэффициент преломления стекла, а  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны сферических поверхностей линзы (рис. 4.12). Значения  $R_1$  и  $R_2$  положительные, если поверхности выпуклые, и отрицательные, если — вогнутые. У линзы на рис. 4.12,а обе поверхности выпуклые, а на рис. 4.12,б — обе вогнутые.

**Пример 4.2.** Первые объективы фотокамер были простыми менисковыми линзами (рис. 4.13). Надо, используя такую линзу, построить модель простейшей фотокамеры, если линза изготовлена из стекла «крон» ( $n = 1,5$ ) с радиусами  $R_1 = 20$  мм и  $R_2 = 15$  мм. Так как  $R_1$  больше, чем  $R_2$ , линза в центре будет более толстой, чем по краям, т. е. будет положительной линзой, несмотря на то что левая поверхность вогнутая. Определим ее фокусное расстояние. В выражении (4.9)  $R_1$  будет отрицательным, а  $R_2$  — положительным, поэтому имеем  $1/f = (1,5-1)(-1/20 + 1/15) = 0,0083$ ,  $f = 120$  мм.

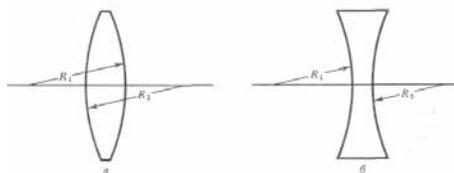


Рис. 4.12.  
Радиусы кривизны сферических поверхностей линзы.

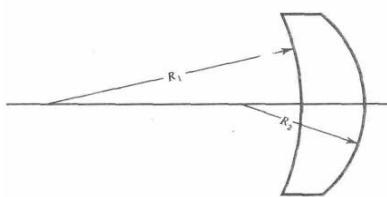


Рис. 4.13. Положительный мениск.

Если известно фокусное расстояние линзы, то можно определить положение изображения объекта при условии, что известно положение объекта относительно линзы.

Изображение может быть найдено геометрически или

математически. Сначала выполним геометрическое построение вследствие его наглядности. На рис. 4.14 представлен ход лучей, дающих изображение точечного объекта  $O$ . Лучи, проходящие через линзу, будут преломляться, создавая точечное изображение в точке их пересечения. Если точечный объект поместить на значительном расстоянии от линзы, то лучи становятся почти параллельными прямой, проходящей через центр линзы и называемой *оптической осью*. Если объект находится в бесконечности, то лучи будут параллельными оптической оси, и изображение создается в точке, называемой *фокусом* линзы (рис. 4.15). Заметим, что все лучи, параллельные оптической оси (оси симметрии), проходят через фокус. Показанные на рис. 4.14 и 4.15 лучи преломляются на обеих поверхностях линзы. Однако в случае тонкой линзы построение можно упростить, продолжив лучи до плоскости, проходящей через оптический центр линзы (рис. 4.16). Для точки, расположенной вне оптической оси, ход лучей представлен на рис. 4.17. Отметим, что луч, проходящий через центр тонкой линзы, не меняет своего направления.

Любой объект и его изображение можно представить в виде набора точек.

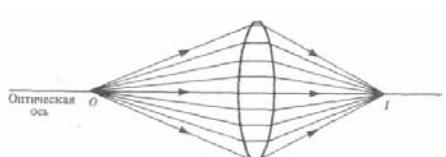


Рис. 4.14.  
Точечный объект и его  
изображение.

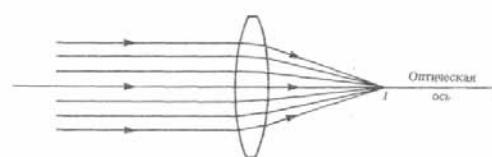


Рис. 4.15.  
Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в линзе сходятся в ее фокусе.

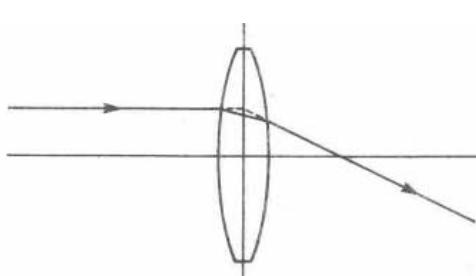


Рис. 4.16.  
Ход луча, параллельного оптической оси тонкой линзы.

При построении изображения объекта конечных размеров воспользуемся теми свойствами тонкой линзы, что все лучи, параллельные оптической оси, проходят через фокус и что все лучи, проходящие через ее центр, не меняют своего направления. На рис. 4.18,а представлен ход лучей, дающих изображение

точечного объекта, а на рис. 4.18,6 — двух точек протяженного объекта. Такое построение

является типичным для всех объектов, расположенных за пределами фокуса положительной тонкой линзы. Отметим, что лучи от каждой точки объекта проходят через все точки линзы. Это

Рис. 4.17.

Построение изображения точечного объекта, лежащего вне оптической оси

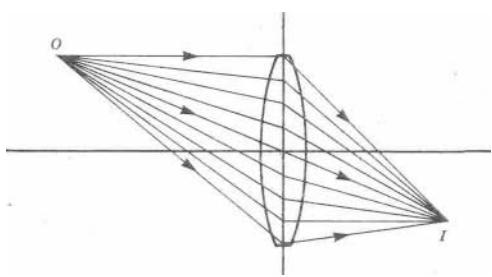
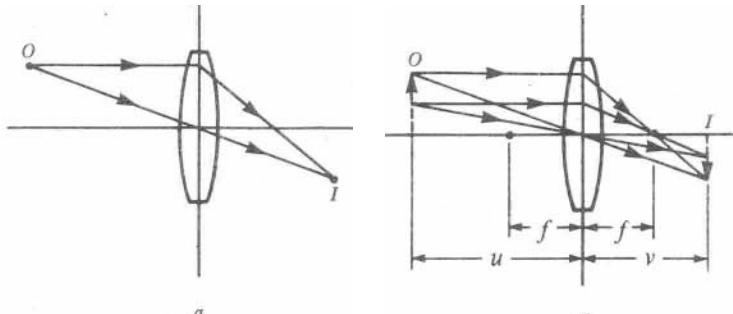


Рис. 4.18.

Прием построения изображений точечного и протяженного объектов в тонкой положительной линзе.



б

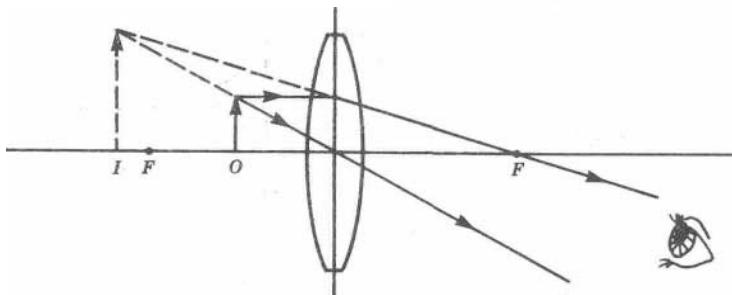


Рис. 4.19.

Построение мнимого изображения протяженного предмета, находящегося между фокусом и линзой (иллюстрация действия лупы)

означает, что два или более световых луча от разных точек объекта могут одновременно проходить через одну точку линзы. Часто полагают, что определенные участки линзы используются для формирования

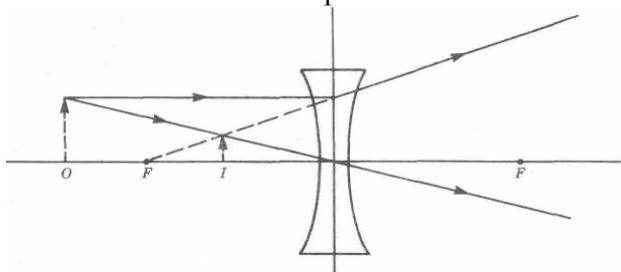
различных частей изображения. Это неверно.

Если все точки объекта лежат в одной плоскости, то в первом приближении точки изображения будут также лежать в одной плоскости, которая называется *плоскостью изображения*. Если последняя перпендикулярна оптической оси и пересекает ее в фокусе  $F$ , то она называется *фокальной плоскостью* и является плоскостью изображения для объекта, расположенного в бесконечности. К сожалению, в фотографии плоскость резкого изображения обычно называют *фокальной плоскостью*, не обращая внимания на расположение объекта. Например, затвор фотокамеры на рис. 2.4 называется «*фокальным*» затвором независимо от того, на какие предметы сфокусирована камера.

Построение мнимого изображения объекта, расположенного между положительной линзой и ее фокусом, показано на рис. 4.19. Отметим, что лучи, вышедшие из линзы, расходятся и в действительности нигде не пересекаются. Для создания изображения, которое можно сфотографировать, лучи должны сходиться. Свет, отраженный от объекта, представляет собой вид энергии и, будучи сконцентрирован в определенном месте на фотопленке, вызовет изменения последней, что и приводит к образованию изображения, которое можно затем проявить и закрепить. Фокусирование на бумагу лупой солнечных лучей приводит к воспламенению бумаги. В точке фокусировки лучей концентрируется энергия, достаточная для воспламенения бумаги. Подобно этому должна быть расположена пленка, на которой формируется действительное (т. е. создаваемое пересекающимися лучами) изображение. Только действительные изображения могут быть зафиксированы на пленке. Стрелка, изображенная на рис. 4.19 штриховой линией, называется *мнимым изображением*. Положение этого изображения можно найти,

Рис. 4.20.

Построение изображения предмета в отрицательной линзе



если продолжить вышедшие из линзы лучи обратно до их пересечения. Такое изображение не может быть зафиксировано на пленке. Однако если объект  $O$  рассматривать через

линзу справа, то мнимое изображение можно увидеть. Линза глаза (хрусталик) формирует действительное изображение изображения на сетчатке глаза.

Построение изображения, формируемого отрицательной линзой, показано на рис. 4.20. Луч, параллельный оптической оси, после преломления отклонится от нее так, что его продолжение проходит через фокус  $F$  с левой стороны линзы. Реальные лучи, вышедшие из линзы, рассеиваются, и изображение всегда будет мнимым. Из приведенных рассуждений следует, что объектив фотокамеры должен быть положительной оптической системой и должен применяться только для формирования действительных изображений объектов, расположенных от объектива на расстояниях, больших, чем ее фокусное расстояние, и что создаваемые им изображения всегда будут перевернутыми. Однако современные фотообъективы обычно состоят из нескольких линз, среди которых могут быть отрицательные.

Хотя графическое представление очень наглядно, без него часто можно обойтись. Если известно фокусное расстояние тонкой линзы, то положение изображения объекта может быть определено с помощью выражения

$$1/M + 1/v = 1/f \quad (4.10)$$

где  $u$  — расстояние от объекта до линзы, а  $v$  — расстояние от изображения до линзы (рис. 4.18,6). Это выражение применимо как к собирающей, так и к рассеивающей линзе (отрицательно для рассеивающей линзы и положительно для собирающей). Знаки остальных величин будут рассматриваться в каждом конкретном случае.

**Пример 4.3.** В модели фотокамеры с раздвижным мехом используется линза с фокусным расстоянием 10 см. Где необходимо поместить пленку, чтобы получить изображения объектов, находящихся на следующих расстояниях от линзы: бесконечность; 10, 5 и 1 м; 20 и 5 см?

**Таблица 4.1. Расстояние  $v$  от задней главной плоскости объектива до изображения для объектива с фокусным расстоянием 10 см в зависимости от расстояния до объекта  $u$**

|                 |          |      |      |      |    |          |     |
|-----------------|----------|------|------|------|----|----------|-----|
| $u, \text{ см}$ | $\infty$ | 1000 | 500  | 100  | 20 | 10       | 5   |
| $v, \text{ см}$ | 10       | 10,1 | 10,2 | 11,1 | 20 | $\infty$ | -10 |

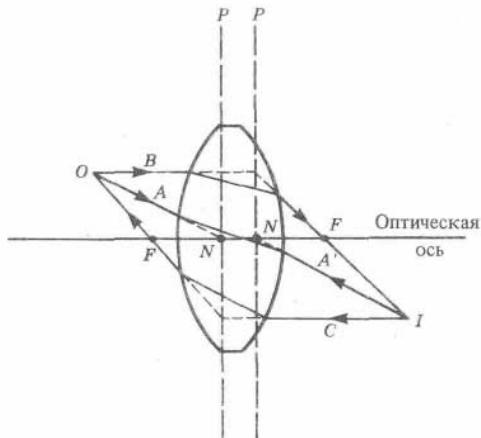
Из выражения (4.10) следует, что если  $u = \infty$ , то  $1/v = 1/f$  и изображение формируется на расстоянии, равном фокусному; то есть пленка должна быть расположена на 10 см позади линзы. Когда  $u = 10 \text{ м} = 1000 \text{ см}$ , имеем  $1/1000 + 1/v = 1/10$ ;  $1/v = (1/10 - 1/100) = 0,099$  и  $v = 10,1 \text{ см}$ . Результаты других аналогичных вычислений приведены в табл. 4.1. Расстояние от линзы до изображения сначала растет довольно медленно, а затем при расстояниях до объекта, сравнимых с  $f$ , увеличивается быстрее. Действительное изображение может быть образовано для расстояния 20 см от объекта до линзы; в этом случае пленка должна быть отодвинута на 20 см от линзы. Если объект расположен в фокусе, то изображение будет в бесконечности (т. е. лучи не пересекутся на конечном расстоянии). Отрицательный результат для объекта, расположенного на расстоянии 5 см от линзы, подразумевает, что изображение мнимое и находится с той же стороны, что и объект (рис. 4.19). Если объект расположить вблизи фокуса, расстояние от линзы до изображения становится очень большим, и фокусирование изображения такого объекта на пленке невозможно из-за ограниченных размеров камеры.

Хотя основные элементы фотообъективов — линзы, в некоторых длиннофокусных объективах для формирования изображения применяют вогнутые зеркала. Можно показать, что фокусное расстояние сферического вогнутого зеркала равно половине его радиуса кривизны и что расстояния до объекта и до изображения удовлетворяют уравнению (4.10) при условии, что зеркало не слишком велико.

#### Толстые линзы

Использование в фотообъективах тонких линз может показаться оправданным, однако даже поверхностный осмотр объективов современных фотокамер показывает, что линзы не тонкие и в большинстве случаев склеены из нескольких элементов. Возникает вопрос: можно ли применять формулу тонкой линзы для объектива, состоящего из двух и более линз? Изображение, образованное первой линзой, можно считать объектом для второй и, последовательно применяя уравнение (4.10), определить положение изображения. Но этот путь довольно сложен. Чтобы определить положение изображения объекта, можно также последовательно воспользоваться законом преломления, но это еще более сложный путь.

Рис. 4.21.  
Ход лучей в толстой линзе.



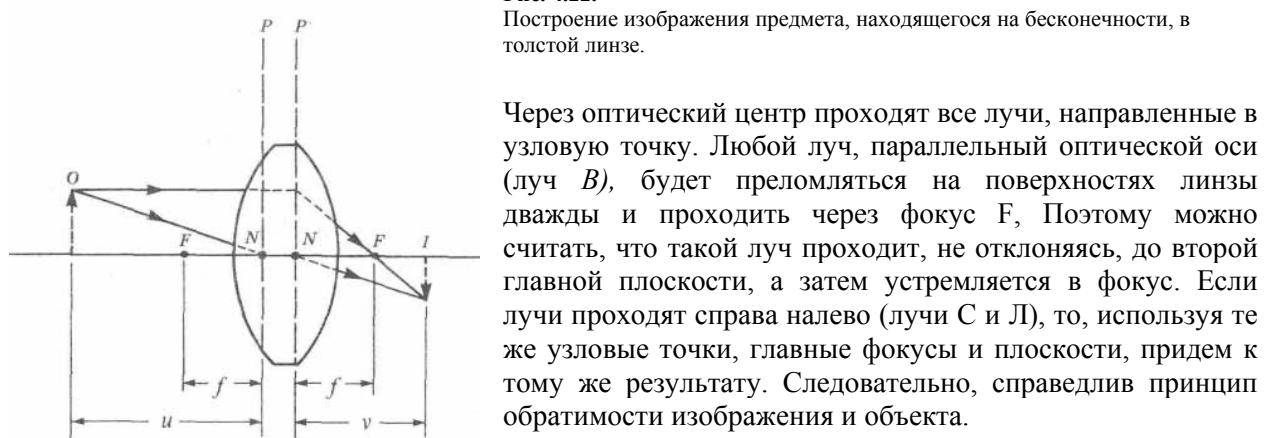
толстой линзы. Рассмотрим сферическую линзу значительной толщины (рис. 4.21). Характеристики изображения, создаваемого такой линзой, могут быть описаны посредством введения двух фокусов, двух *главных плоскостей*, оптической оси и двух *узловых точек*. Строго говоря, эти точки нужно называть *главными точками*, которые совпадают с узловыми, если по обе стороны линзы находится одна и та же среда. Для понимания концепции толстой линзы понятие оптического центра весьма полезно, хотя и не необходимо при описании ее действия. Здесь рассматривается линза, помещенная в однородную среду (воздух). Более общий случай изложен в книге Моргана<sup>11</sup>.

Две главные плоскости  $P$  толстой линзы перпендикулярны ее оптической оси и пересекают эту ось в узловых точках  $N$ . Последние обладают следующим свойством: любой луч, проходящий через первую узловую точку, будет выходить с другой стороны линзы параллельно падающему лучу и проходить через вторую узловую точку (на рис. 4.21 это лучи  $A$  и  $A'$ ). Реально луч преломляется на первой поверхности линзы, проходит через оптический центр на оптической оси и преломляется еще раз на второй поверхности.

<sup>11</sup> Morgan J., Introduction to Geometric and Physical Optics, N Y.- McGraw Hill, 1953, p. 57ff

Рис. 4.22.

Построение изображения предмета, находящегося на бесконечности, в толстой линзе.



Через оптический центр проходят все лучи, направленные в узловую точку. Любой луч, параллельный оптической оси (луч  $B$ ), будет преломляться на поверхностях линзы дважды и проходить через фокус  $F$ . Поэтому можно считать, что такой луч проходит, не отклоняясь, до второй главной плоскости, а затем устремляется в фокус. Если лучи проходят справа налево (лучи  $C$  и  $L$ ), то, используя те же узловые точки, главные фокусы и плоскости, придем к тому же результату. Следовательно, справедлив принцип обратимости изображения и объекта.

Для толстой линзы можно определить фокусное расстояние ( $f$ ) (расстояние между соответствующими фокусной точкой и узловой точкой). Характеристические точки, используемые при построении изображения, могут быть определены графически (рис. 4.22) или математически, согласно выражению (4.10), где  $u$  и  $v$  — расстояния до объекта и изображения, измеренные от соответствующих главных плоскостей (рис. 4.22). У симметричной толстой линзы главные плоскости располагаются симметрично. Отметим, что это не всегда так, и в некоторых случаях главные плоскости могут быть вне линзы и, кроме того, поменяться местами (книга Моргана, с. 62). Главные плоскости линзы можно определить экспериментально: путем визуального наблюдения хода лучей, падающих параллельно оптической оси или путем вращения линзы вокруг одной из узловых точек (книга Моргана, с. 69).

В общем случае несколько тонких линз (элементов фотообъектива) могут быть представлены эквивалентной толстой линзой, имеющей характеристики согласно определению толстой линзы (т. е. две главные плоскости, пересекающие оптическую ось в узловых точках, и два фокуса, определяющих фокусное расстояние от соответствующих главных плоскостей). Эта возможность имеет важное значение при описании характеристик объективов. Благодаря указанному

В случае двух линз, если известно фокусное расстояние каждой из них, можно определить фокусное расстояние их комбинации математически из выражения

$$f = f_1 f_2 / (f_1 + f_2)$$

где  $f$  — общее фокусное расстояние обеих линз,  $f_1$  и  $f_2$  — фокусные расстояния линз и  $s$  — расстояние между ними. Этот способ несколько сложнее, чем применяемый в случае одной тонкой линзы, так как необходимо установить положение плоскости, заменяющей линзу (рис. 4.16).

Концепция тонкой линзы представляет собой упрощение более сложной и всеобъемлющей концепции

представлению набор относительно тонких линз может определяться одним фокусным расстоянием.

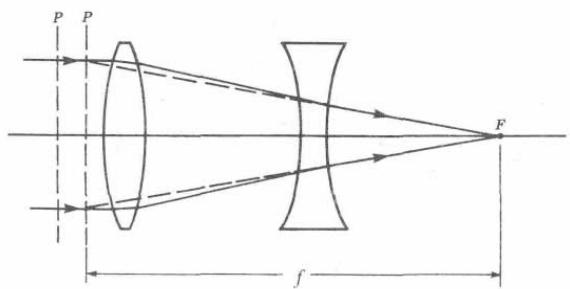


Рис. 4.23.  
Схема телеобъектива

### Оптические системы

Для того чтобы решить проблему фокусировки (см. пример 4.3), в фотообъективах применяют несколько линз. Классическим примером является телеобъектив, который в простейшем виде представляет собой собирающую линзу, помещенную перед рассеивающей линзой (рис. 4.23). Если линзы имеют надлежащие фокусные

расстояния и соответствующим образом расположены, можно создать систему линз, в которой задняя главная плоскость находится перед системой. Так как фокусное расстояние измеряется от главной плоскости, физическая длина объектива может быть сделана меньше, чем его фокусное расстояние, и поэтому объектив может быть весьма компактным. Кроме того, такой объектив будет более легким и более удобным в обращении, чем объектив, изготовленный из одной линзы. К сожалению, термин «телеобъектив» последнее время используют для любого относительно длиннофокусного объектива применительно к определенному формату. Например, объектив с фокусным расстоянием, превышающим 100 мм, для 35-мм малоформатной фотокамеры считается телеобъективом. Однако термин «телеобъектив» определяется только конструкцией объектива. В приведенном примере более подходящим термином является *длиннофокусный объектив*. *Короткофокусный объектив* — это объектив, в котором отрицательная линза расположена перед положительной (рис. 4.24). Если линзы имеют определенные фокусные расстояния и расположены определенным образом, то задняя главная плоскость может располагаться позади системы линз.

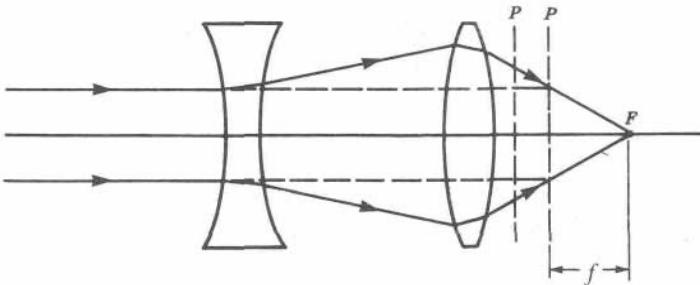


Рис. 4.24.  
Схема короткофокусного объектива.

Такая конструкция особенно полезна для широкоугольных объективов, предназначенных для малоформатных однообъективных зеркальных камер; типичный широкоугольный объектив имеет фокусное расстояние около 30 мм.

Если задняя главная плоскость

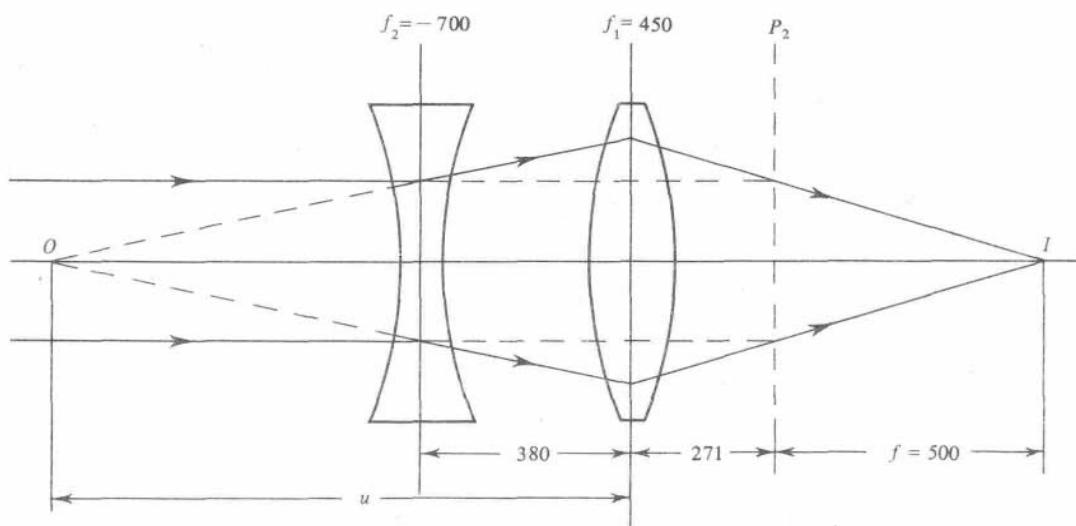
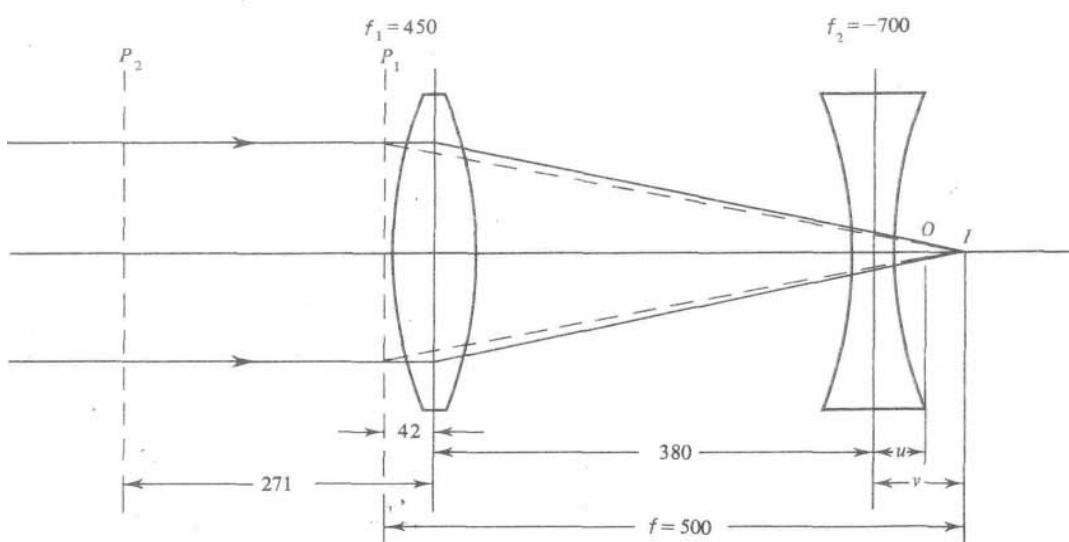
расположена внутри системы линз, то пространство позади крайней линзы и перед фокусом объектива будет меньше 30 мм. Для короткофокусного объектива фокусное расстояние измеряется от узловой точки позади линзы, т. е. в этих объективах больше рабочего пространства, в котором можно расположить зеркало, затвор и другие необходимые механические части камеры.

**Пример 4.4.** Пусть имеется телеобъектив с фокусным расстоянием 500 мм, который используется с 35-мм однообъективной зеркальной фотокамерой. Передняя линза объектива имеет фокусное расстояние 450 мм, задняя — 700 мм, и они расположены на расстоянии 380 мм друг от друга. Найти положение главной плоскости этого объектива.

Определив положение изображения бесконечно удаленного объекта, найдем положение фокальной плоскости и фокуса. Отмерив расстояние 500 мм от фокуса, получим положение первой главной плоскости. Из рис. 4.25 видно, что передняя линза давала бы изображение объекта, находящегося на бесконечности, в точке *O*, расположенной на расстоянии 450 мм позади линзы. Однако лучи, падающие на отрицательную линзу, отклоняются так, что изображение формируется в точке *I*. Изображение в точке *O* можно рассматривать как мнимый объект для отрицательной линзы. Расстояние до объекта *u* равно  $380 - 450 = -70$  мм. Подставляя его в выражение (4.10), найдем  $-1/u + 1/v = -1/70$  и  $v = 78$  мм. Следовательно, главная плоскость расположена на расстоянии  $500 - 78 = 42$  мм перед первой линзой.

Чтобы найти вторую главную плоскость, переставим линзы местами, найдем положение изображения бесконечно удаленного объекта и определим вторую главную плоскость (рис. 4.26).

**Рис. 4.25.**  
Ход лучей в  
телеобъективе в  
условиях  
примера  
4.4.



**Рис. 4.26.**  
Ход лучей в короткофокусном объективе в условиях примера 4.4

Полученный объектив будет теперь короткофокусным объективом. В этом случае отрицательная линза формирует мнимое изображение на расстоянии 700 мм слева от нее. Это изображение будет действительным объектом для собирающей линзы, который расположен на расстоянии  $u = 700 + 380 = 1080$  мм слева от положительной линзы. Используя выражение (4.10), находим  $1/1080 + 1/v = 1/450$  и  $v = 771$  мм. Главная плоскость в этом случае должна располагаться на расстоянии 500 мм перед изображением или на расстоянии  $771 - 500 = 271$  мм справа от положительной линзы. Следовательно, обе главные плоскости лежат вне системы линз со стороны положительной линзы. Их взаимное расположение показано на рис. 4.25. Штриховые линии указывают ход лучей для эквивалентной толстой линзы и их преломление на главной плоскости. Полученный объектив с переставленными линзами представляет собой длиннофокусный объектив для 35 мм фотокамеры. Обратный переворот делает этот объектив короткофокусным, но не широкоугольным для этого формата. В широкоугольном объективе линзы должны иметь другие фокусные расстояния и по-другому располагаться.

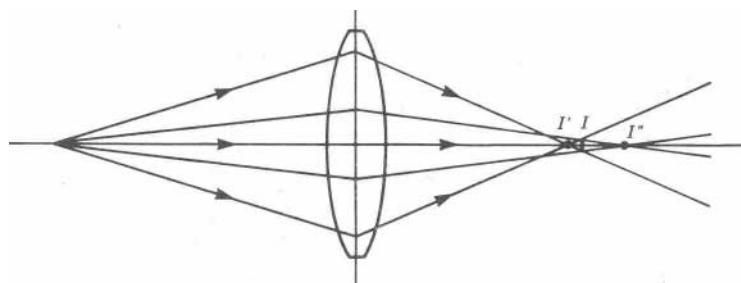
#### Аберрации и недостатки линз

Отметим, что представления, используемые для описания сферических линз, до некоторой степени упрощены. Не во всех случаях сферическими линзами формируются точечные изображения точечных объектов, особенно в случае линз большого диаметра. Используемые представления справедливы только для так называемых *параксиальных лучей* (практически параллельных оптической оси линзы и проходящих вблизи нее). На практике в объективах фотокамер попадают не только параксиальные лучи, и поэтому изображения подвержены некоторым видам *аберраций* (погрешностей оптических систем), которые, не будучи скорректированы, могут приводить к неудовлетворительному для фотографии качеству

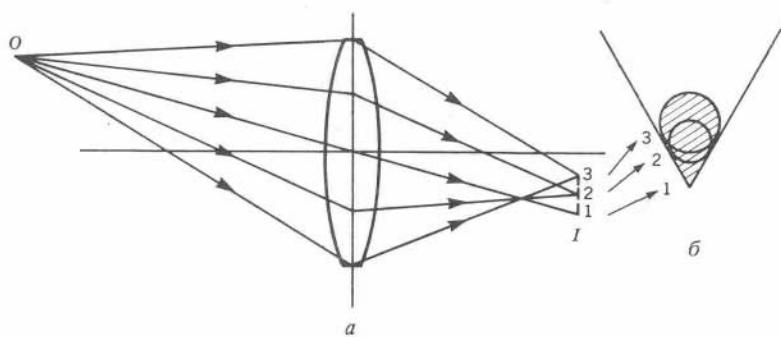
изображения. В случае изображения, создаваемого простой линзой, присутствуют все виды aberrаций одновременно, но в различной степени. Однако в последующем изложении каждый вид aberrации будет рассматриваться в предположении отсутствия остальных видов. В каждом случае поведение простой двояковыпуклой положительной линзы будет использовано для демонстрации и описания aberrации. Для более подробного ознакомления можно рекомендовать книгу Моргана (с. 85).

При внимательном рассмотрении изображения точечного объекта, лежащего на оптической оси положительной линзы, обнаруживается, что изображение представляет собой не точку, а пятно. Если, используя закон преломления, тщательно начертить лучи, проходящие через линзу, то получим, что периферийные лучи отклоняются сильнее, чем параксиальные (рис. 4.27). Если рассматривать изображение в точке  $I'$ , то здесь периферийные лучи будут в фокусе, а параксиальные лучи будут размывать изображение. Если рассматривать изображение в точке  $I''$ , то справедливо обратное. Лучшее изображение (пятно меньшего диаметра) находится в точке  $I$  и представляет собой круг, называемый *кружком рассеяния* (на рис. 4.27 этот круг обозначен вертикальной чертой). Это так называемая *сферическая aberrация*.

Если точечный объект смещен относительно оптической оси, то имеет место aberrация, называемая *комой*. Если лучи, лежащие в плоскости оптической оси и объекта  $O$  (рис. 4.28, а), аккуратно начертить, наилучшее изображение объекта будет иметь вид отрезка прямой линии, а не точки. Все лучи, падающие на внешние части линзы (обозначенные на рис. 4.28 цифровые 3), образуют круглое пятно в плоскости, перпендикулярной оптической оси (рис. 4.28, б). Лучи, падающие на центральную часть линзы, образуют уменьшенное пятно, центр которого сдвинут относительно центра первого пятна в плоскости (рис. 4.28, а и б). На рис. 4.28, б представлен общий вид образующегося изображения. Последнее выглядит подобно голове кометы, которую астрономы называют комой. При перемещении точечного объекта  $O$  в направлении оптической оси кома



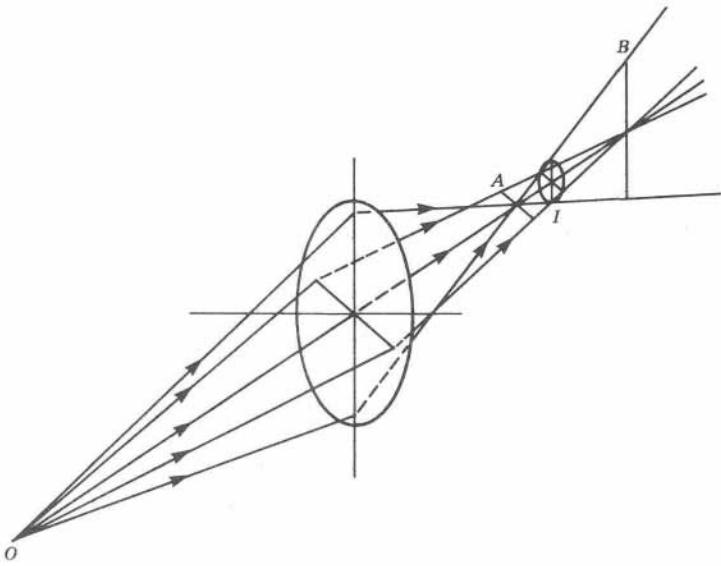
**Рис. 4.27.**  
Возникновение сферической aberrации в положительной линзе



**Рис. 4.28.**  
Кома положительной линзы, а — изображение в плоскости точечного объекта, создаваемое лучами, которые распространяются в плоскости, содержащей объект и оптическую ось; б — создаваемое всем пучком лучей изображение в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

уменьшается и вырождается в круг, когда объект достигает оптической оси.

**Астигматизм** представляет собой еще один вид искажения изображения точечного объекта, лежащего вне оптической оси. Сравнение лучей, которые лежат в плоскости, определяемой объектом и оптической осью, с лучами в перпендикулярной плоскости, содержащей оптическую ось (рис. 4.29), показывает, что эти лучи образуют точечные изображения на разных расстояниях от линзы. Лучи, которые проходят в плоскости, содержащей точечный объект, собираются в точке  $A$ , а лучи, проходящие в перпендикулярной плоскости, собираются в точке  $B$ . Изображение, получаемое вблизи точки  $A$ , представляет собой горизонтальную линию, потому что лучи, проходящие в перпендикулярной плоскости, собираются за этой точкой (в точке  $B$ ). Аналогично изображение, формирующееся вблизи точки  $B$ , есть вертикальная линия, так как лучи в плоскости, содержащей объект, сходятся в точке  $A$  и расходятся в точке  $B$ . Если рассматривать пучок лучей, проходящих через всю линзу, то на выходе из линзы его поперечное сечение будет представлять собой эллипс, который затем вырождается в отрезки линий  $L$  и  $B$ .



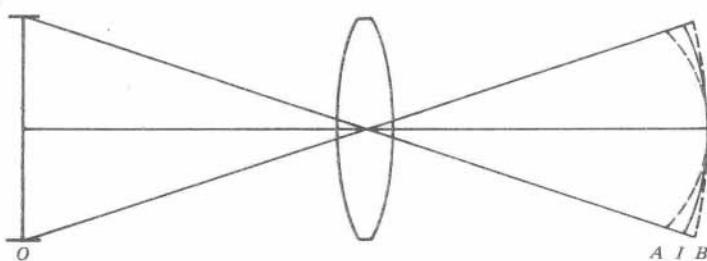
**Рис. 4.24.**  
Возникновение астигматизма в простой сферической линзе.

Эти линии показаны на рисунке в виде прямых, что не совсем верно. В промежутке между  $A$  и  $B$  (около точки  $I$ ) сечение пучка света сокращается до небольшого пятна, представляющего собой наилучшее изображение объекта. Рассмотренная аберрация не имеет никакого отношения к дефекту глаза, называемого астигматизмом. Этот дефект обусловлен неравномерной кривизной роговой оболочки, реже хрусталика. Линза, обладающая подобным

недостатком, называется астигматической, с чем и связано появление термина «астигматизм глаза». Такая линза может быть приблизительно представлена в виде комбинации сферической и цилиндрической линз. Астигматизм глаза и астигматизм линзы вызывают различные искажения изображения. Например, если человек с астигматизмом глаз рассматривает колесо со спицами вдоль оси колеса, то только одна пара радиально противоположных спиц в отличие от остальных будет видна четко сфокусированной. Если сферическая линза на рис. 4.29 используется для формирования изображения того же самого колеса, то все спицы будут в фокусе в позиции  $B$ , а обод будет в фокусе в позиции  $A$ .

Создаваемое сферической линзой изображение в плоскости, перпендикулярной оптической оси, не является плоским и имеет форму искривленной поверхности. Этот вид аберрации называется *кривизной поля изображения* (рис. 4.30). Поверхность может быть выпукла или по направлению к линзе, или от нее в зависимости от вида линзы. Если последовательно построить изображения всех точек плоскости подобно тому, как это было сделано для одной точки на рис. 4.29, то обнаружим, что искаженные изображения возникают по обе стороны наилучшего изображения плоскости (на рис. 4.30 их проекции на плоскость рисунка показаны штриховыми линиями). Проекция наименее искаженного изображения проведена сплошной линией.

Расположив ирисовую диафрагму перед сферической линзой (рис. 4.31), а в качестве объекта используя сетку с квадратными ячейками, получим изображение в виде бочонка (*бочкообразная дисторсия*). Если диафрагму придвигнуть вплотную к линзе, то дисторсия уменьшится. Располагая ирисовую диафрагму позади линзы, получим *подушкообразную дисторсию* (рис. 4.32). Изображение имеет сходство с проекцией квадратной сетки на сферическую поверхность, подобную подушке,



**Рис. 4.30.**  
Искривление плоскости изображения.

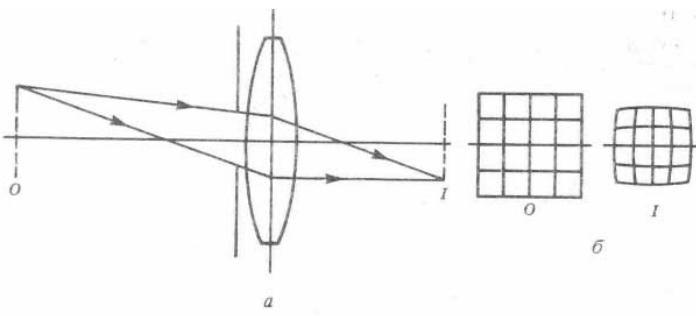


Рис. 4.31.

Бочкообразная дисторсия. а — ход лучей, б — объект  $O$  и его изображение  $I$ .

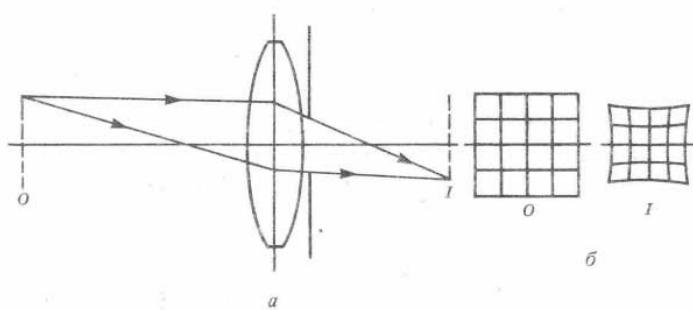


Рис. 4.32.

Подушкообразная дисторсия. а — ход лучей, б — объект  $O$  и его изображение  $I$ .

откуда и происходит этот термин. В каждом случае различные части объекта увеличиваются по-разному. В центре увеличение больше для бочкообразной дисторсии, а по периметру — для подушкообразной дисторсии. Рассмотренные виды дисторсии несходны потому, что при формировании изображения используются различные части поверхности линзы различным образом (рис. 4.31, и 4.32, а).

До сих пор предполагалось, что свет

является *монохроматическим* (одной определенной частоты). Так как показатель преломления зависит от частоты света и фокусное расстояние линзы зависит от показателя преломления, из выражения (4.10) следует, что положение изображения зависит от частоты света. Вследствие того, что фиолетовые лучи отклоняются больше, чем красные, при прохождении через положительную линзу, фиолетовое изображение точечного объекта формируется ближе к линзе (рис. 4.33), чем красное. Рассмотренный пример иллюстрирует *продольную хроматическую aberrацию*.

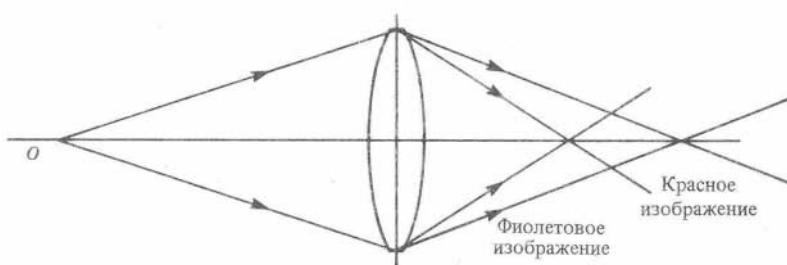


Рис. 4.33.

Продольная хроматическая aberrация положительной линзы.

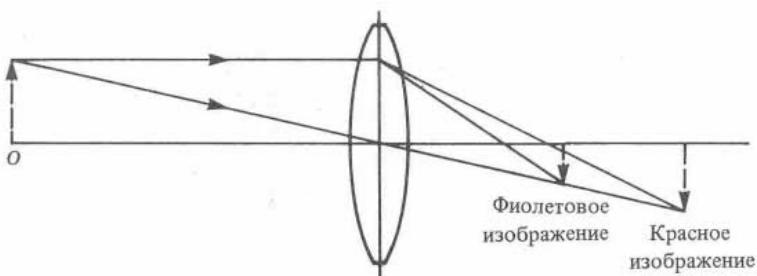


Рис. 4.34.

Хроматическая разность увеличений положительной линзы

Построение изображения протяженного объекта с использованием хода лучей, приведенного на рис. 4.18, показывает, что размер фиолетового изображения будет

меньше, чем у красного (рис. 4.34). Эта разность размеров изображений есть пример второй хроматической aberrации, которая носит название *хроматической разности увеличений*. Красный и фиолетовый неотклоняемые лучи, проходящие через центр линзы, совпадают, а лучи, параллельные оптической оси, отклоняются по-разному, поскольку фокусное расстояние линзы короче для фиолетового луча, чем для красного.

Хотя и не будучи aberrацией в строгом смысле этого слова, отражение от поверхностей линзы может приводить к многим трудностям при работе с фотокамерами. Это явление схематически показано на рис. 4.35 для простой положительной линзы. Луч, падающий на линзу, частично

отразится и преломится в точке 1. Аналогично свет ведет себя в любой другой точке линзы. В результате отражения света в точке 1 и его преломления в точках 3 и 5 понижается яркость изображения. Лучи света, преломленные в точках 4 и 6, могут привести к искажению изображения, так как эти лучи не совпадут в плоскости изображения с лучом, исходящим из точки 2. В фотокамере некоторые из этих искажающих изображение лучей также могут отражаться от внутренних поверхностей камеры, приводя к еще большему ухудшению изображения. В фотографии это явление называется *светорассеянием*.

Если параллельный пучок света проходит через небольшое отверстие, то можно ожидать, что изображение отверстия на экране будет резким. Однако если отверстие достаточно мало, на экране кроме освещенного пятна будет видно несколько концентрических освещенных колец (рис. 4.36). Это явление называется *дифракцией* и является помехой для фотосъемки при малых отверстиях диафрагмы.

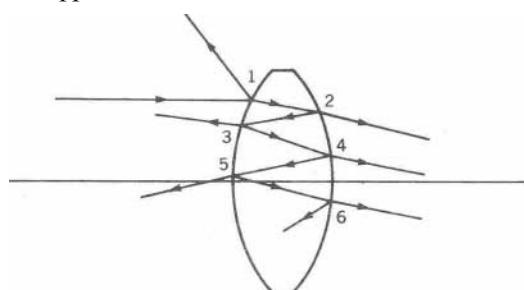


Рис. 4.35.  
Отражение свeta от внутренней и наружной поверхностей линзы

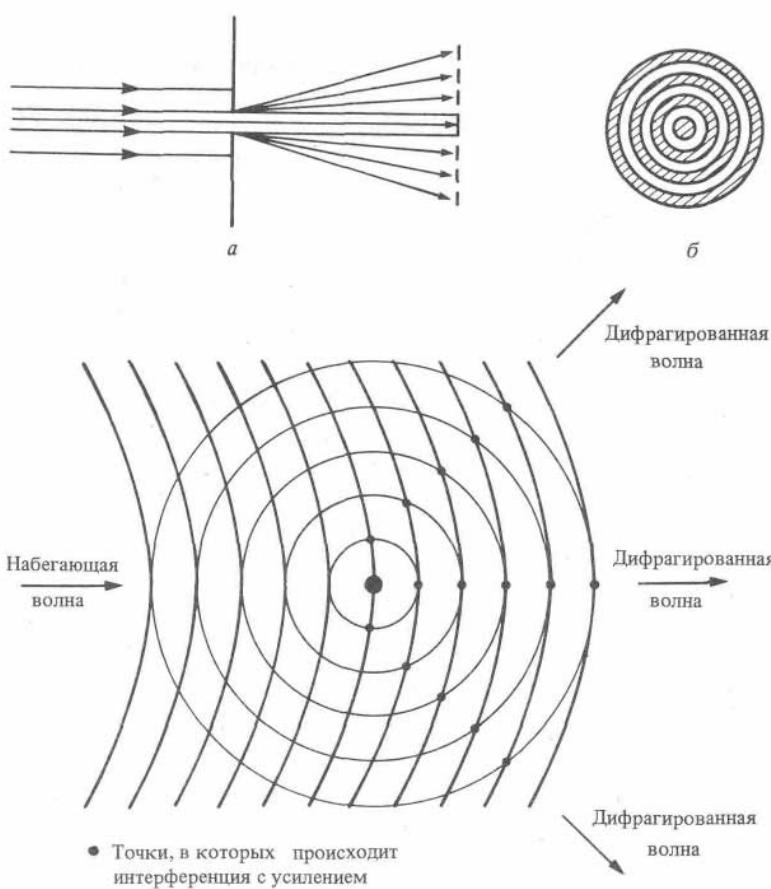


Рис. 4.36.  
Дифракция света на краях отверстия в  
экране *a* — ход лучей, *b* — вид  
изображения на экране

Рис. 4.37.  
Интерференция набегающих и  
отраженных волн, распространяющихся  
на поверхности стоячей воды.

Качество изображения на пленке ухудшается потому, что дифракционные кольца, хотя и не влияют на центральную часть изображения, искажают его края. Причина этого явления может быть объяснена с позиций волновой модели света. Рассмотрим волны, которые двигаются мимо стержня в стоячей воде (рис. 4.37). Оказывается, что набегающие на стержень волны генерируют новые круговые волны, центр которых находится в месте расположения стержня. Эти волны интерферируют с набегающими волнами, что приводит к возрастанию амплитуды волн в некоторых

регулярно расположенных точках и к ее убыванию в других подобных точках. В случае света, проходящего через малую диафрагму, края последней действуют аналогично стержню, и в плоскости изображения (рис. 4.36, *b*) появляются регулярно расположенные интерференционные кольца. Математическая трактовка явления показывает, что диаметры колец приблизительно пропорциональны расстоянию между отверстием и плоскостью наблюдения и обратно пропорциональны диаметру отверстия. Следовательно, диаметр интерференционных колец

пропорционален значению диафрагмы, установленному яг объективе фотокамеры.

### Исправление аберраций объективов и искажений изображения

Для получения хороших фотографий надо устранять (или хотя бы уменьшать) недостатки оптических систем. Особенно это касается малоформатных камер, так как полученные с их помощью негативы необходимо значительно увеличивать при изготовлении фотоотпечатков. Если указанные недостатки не уменьшать, то угол поля изображения (гл. 5) и разрешающая способность будут ограниченны, а тональность изображения искажена. Кроме того, максимальное действующее отверстие объектива будет ограничено, что не позволяет фотографировать многие слабоосвещенные объекты.

Различные виды аберраций были рассмотрены применительно к двояковыпуклой собирающей линзе. Однако если изменить форму поверхности линзы, то можно частично устраниć аберрации. Меняя положение и (или) величину отверстия диафрагмы, можно уменьшить аберрации и дифракцию. Некоторые виды аберраций могут быть ослаблены путем использования стекол с различными показателями преломления и различной дисперсией и (или) путем подбора соответствующих положений элементов объектива. С толщиной линзы также могут быть связаны некоторые искажения. Тонкие покрытия из прозрачных материалов, нанесенные на поверхность линзы, могут ослаблять отражение от ее поверхностей. Отметим, что не существует способов, с помощью которых можно полностью устраниć все виды аберраций; однако аберрации могут быть существенно уменьшены.

Например, кому и сферическую аберрацию можно значительно ослабить путем изменения формы линзы и подбором показателя преломления стекла, из которого она изготовлена. Астигматизм и искривление плоскости изображения можно уменьшить подбором формы линз объектива и соответствующим расположением диафрагмы. Хроматическая аберрация может быть уменьшена, если линзы склеивать из двух элементов, изготовленных из стекол с различной дисперсией, и (или) подбирать соответствующее расположение элементов объектива. Дисторсию можно ослабить, используя линзы симметричной формы. Большинство современных высококачественных объективов конструируют на основе математического моделирования действия линз и экспериментального изучения оптических свойств полученных таким способом моделей объективов.

Приведенное ниже описание истории развития объективов не является полным и ограничивается только рассмотрением некоторых наиболее известных объективов. Систематическое усовершенствование объективов, вероятно, началось приблизительно в 1812 г., когда Волластон применил простой мениск (выпукло-вогнутую линзу) (рис. 4.38) в камере-обскуре. В 1840 г. Шевалье использовал *ахромат* в первых фотокамерах. Этот объектив состоял из двух линз с различной дисперсией, склеенных вместе (рис. 4.39), что позволяло устраниć хромати-

Рис. 4.38.  
Простейший мениковый объектив Волластона

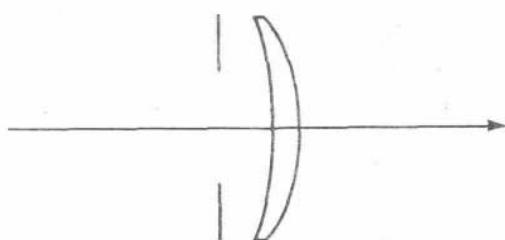
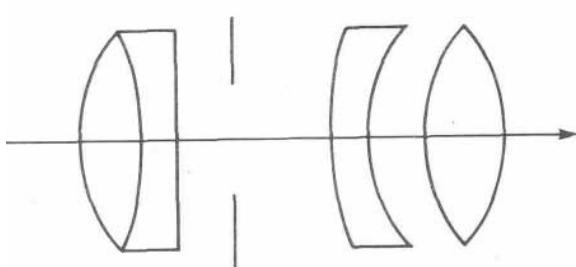


Рис. 4.39.  
Объектив ахромат Шевалье.

ческую аберрацию для определенных длин волн. Объектив может быть использован при относительных отверстиях не более 1:16. В настоящее время ахроматами называются объективы, которые исправлены на хроматическую аберрацию для двух длин волн. *Anахромат* — объектив, в котором скорректирована хроматическая аберрация для трех цветов.

В 1840 г. Петцваль сконструировал многоэлементный объектив (рис. 4.40), который эффективно корректировал сферическую аберрацию, кому и хроматическую аберрацию и позволял использовать относительное отверстие 1:3,5 при условии, что угол зрения не был слишком

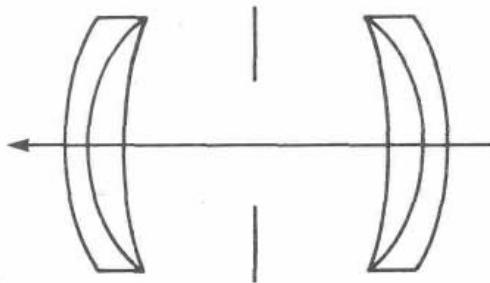
большим. Этот портретный объектив Петцвала не пригоден для ландшафтной съемки, поскольку он дает значительный астигматизм и искривление поля изображения.



— *апланат*. В настоящее время термин «апланат» означает, что исправлены сферическая aberrация и кома.

**Рис. 4.40.**  
Портретный объектив Петцвала

В 1866 г. Дальмайер в Англии и Стейнхейл в Германии объединили два ахроматических менисковых объектива (рис. 4.41) и получили симметричный объектив, который существенно корректировал все виды aberrаций и искажения изображений, так что его можно было использовать при относительном отверстии 1:8 с углом зрения 50°. Английский объектив получил название *светосильный Ректилинеар*, а немецкий



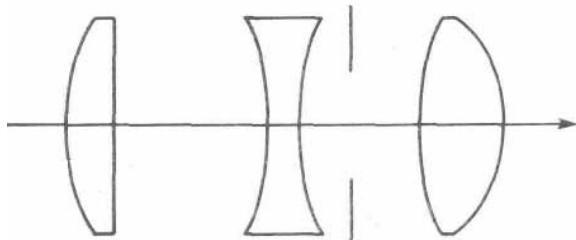
**Рис. 4.41.**  
Светосильный объектив Ректилинеар (апланат).

Некоторые из этих объективов были сконструированы с возможностью вывинчивания передней линзы и назывались «объективными наборами». Без передней линзы объектив имел приблизительно удвоенное фокусное расстояние и прежнюю светосилу. Отметим, что по мере совершенствования объективов для улучшения их оптических свойств используется все больше элементов, изготовленных из различных

сортов стекла. До 1886 г. выбор стекла был ограничен кроном и флинтом. В том же году в Йене (Германия) на заводе Шотта было изготовлено несколько новых видов стекла с различными показателями преломления и дисперсии, что открыло новые пути в конструировании объективов. В 1893 г., используя новые виды стекла, Тейлор изготовил асимметричный объектив из трех элементов, который был назван *триплетом Кука* (рис. 4.42). Этот объектив, устранивший астигматизм и кривизну плоскости изображения, был первым среди так называемых *анастигматов*. Триплет Кука был сконструирован для использования с относительными отверстиями не более 1:4. Анастигмат представляет собой объектив, который полностью свободен от астигматизма для определенного расстояния до объекта и имеет минимальную кривизну плоскости изображения. Однако такой объектив и для других дистанций наводки дает относительно правильное изображение.

В 1902 г. фирма «Карл Цейсс» разработала объектив *Цейсс Tessar* (рис. 4.43), в котором использован задний приклеенный элемент. Модификации этого объектива используются сегодня при относительных отверстиях не более 1:2,8.

Другой исторически важный образцовый объектив был сконструирован Рудольфом в 1896 г. (рис. 4.44) и назван *Цейсс Планар*. Этот симметричный объектив был разработан для использования при относительных отверстиях не более 1:3,5 и стал базовой моделью многих современных стандартных объективов, используемых в малоформатных фотокамерах.



**Рис. 4.42.**  
Объектив триплет Кука

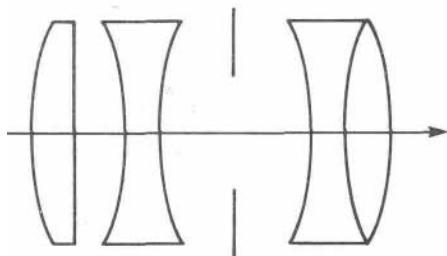


Рис. 4.43.  
Объектив Цейсс Тессар

Современные объективы такой принципиальной конструкции обладают относительным отверстием до 1:1,4. Детальное описание устройства этих объективов здесь не приводится, однако надо сказать о четырех новшествах, примененных в них. Впервые в 1934 г. были изготовлены стекла с добавками редкоземельных элементов. Они

обладали более высокими показателями преломления по сравнению с любыми другими стеклами и обеспечивали большие возможности при конструировании объективов. Развитие электронно-вычислительных машин в течение второй мировой войны позволило начиная приблизительно с 1950 г. рассчитывать более сложные конструкции объективов. Для космических полетов в 1960-х годах потребовались еще более совершенные объективы; в это время были сконструированы новые усложненные оптические системы, которые затем использовали в коммерческих фотоаппаратов. Недавно благодаря достижениям современной технологии и повысившимся возможностям компьютеров стало возможным рассчитывать более сложные, чем сферические, поверхности линз. Такие линзы, называемые *асферическими*, обычно изготавливаются формовкой органических пластиков или оптического стекла. Асферические линзы позволяют уменьшить число элементов объектива и повысить светосилу без ухудшения всех остальных оптических характеристик.

По мере возрастания числа элементов, из которых изготовлен объектив, возникновение светорассеяния становится серьезной проблемой. Если на поверхность линзы нанести слой

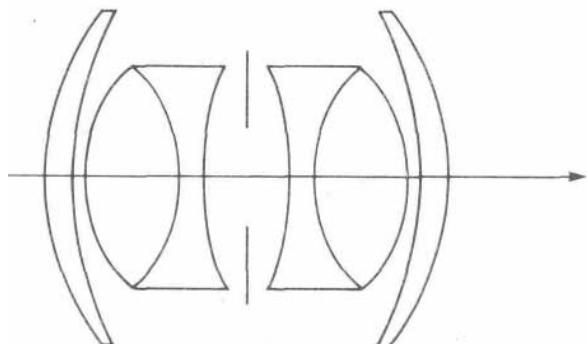
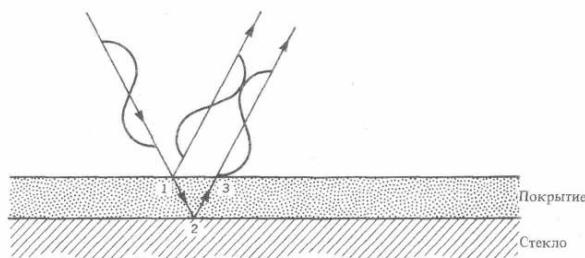


Рис. 4.44.  
Объектив Цейсс Планар.  
Рис. 4.45.  
Интерференция света отраженного от двух параллельных поверхностей.

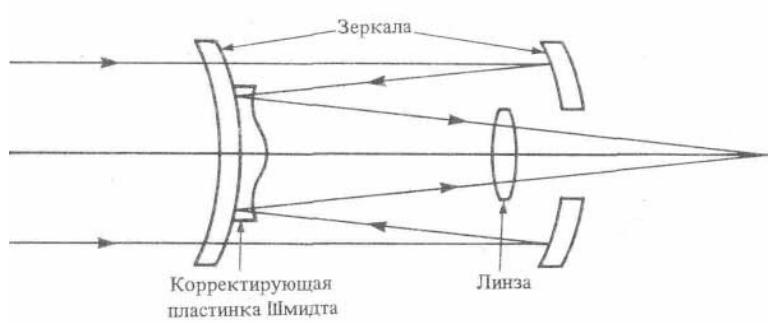


вещества с определенной толщиной и меньшим показателем преломления, чем у самой линзы, то можно уменьшить отражение от поверхностей линзы. Этот эффект достигается благодаря тому, что свет, отраженный от двух поверхностей, интерферирует с взаимным ослаблением, что уменьшает отражение от линзы. Если свет, отраженный от двух поверхностей, рассматривать с волновой точки зрения (рис. 4.45), то можно обнаружить, что фазы двух отраженных волн различаются. Если длина оптического пути в покрытии (7—2—3) точно равна половине длины волны света в среде, то разность фаз двух отраженных лучей составит

$180^\circ$ , и, складываясь, они взаимно погасят друг друга. В результате от линзы вообще не будет отражаться излучение с определенной длиной волны. Это условие может быть удовлетворено только для одной определенной длины волны, однако происходит значительное ослабление отраженного света и для соседних длин волн. При использовании нескольких покрытий с различными показателями преломления отражение от поверхностей линзы может быть значительно уменьшено для большей части видимого спектра. Линзы с таким покрытием называют *просветленными*. Просветление впервые стали применять в объективах коммерческих фотокамер начиная с 1950-х годов, а многослойные покрытия — с 1970-х годов.

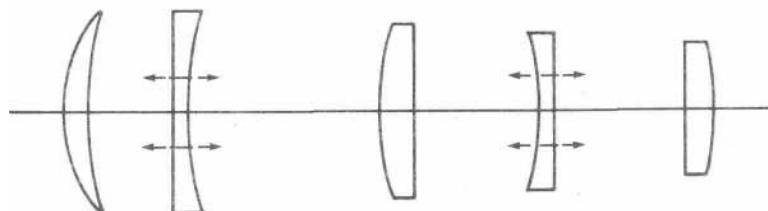
Теперь рассмотрим вопросы совершенствования длиннофокусных и широкоугольных объективов. Объективы таких типов используются в малоформатных камерах в качестве телеобъективов в первом случае и короткофокусных объективов во втором. В конструкциях некоторых длиннофокусных объективов для уменьшения их общей длины применяются сферические зеркала (рис. 4.46). Свет попадает в объектив через круглое отверстие и отражается по крайней мере от двух зеркал, прежде чем сфокусируется на плоскости пленки. Так как свет входит в объектив лишь

по его периметру, ирисовая диафрагма не может быть использована для уменьшения действующего отверстия, и поэтому для регулирования освещенности применяют *светофильтры*. Сферические зеркала подвержены значительной сферической аберрации, поэтому для исправления этой аберрации обычно используется специальная асферическая линза, называемая корректирующей пластинкой Шмидта. В этих объективах также применяются сферические линзы, которые служат для дополнительной фокусировки света. По мере совершенствования технологии изготовления линз объективы с изменяемым фокусным расстоянием (зум-объективы) становятся все более доступными. В таких объективах элементы можно перемещать относительно друг друга, что приводит к изменению фокусного расстояния объектива (рис. 4.47). Фокусировка объектива осуществляется путем перемещения входного блока линз относительно фотокамеры. Фокусное расстояние изменяется при перемещении элементов объектива относительно друг друга, как показано штриховыми стрелками на рисунке.



**Рис. 4.46.**

Схема зеркально-менискового телеобъектива



**Рис. 4.47.**

Схема действия объектива с изменяемым фокусным расстоянием

В *панкратическом объективе* для изменения фокусного расстояния перемещается более чем один элемент, так что выбранный объект постоянно остается в фокусе при изменении фокусного расстояния.

Качество изображения и светосила зум-объективов были значительно улучшены в последние несколько лет. Хотя и не так надежно, как стандартные объективы (при сравнении по оптическим свойствам), хорошие панкратические объективы могут работать при относительных отверстиях 1:3,5. Объективы этого типа, однако, более сложны, дорогостоящи и весят больше, чем стандартные объективы со сравнимыми фокусными расстояниями.

При выборе объектива очень важно знать, для каких целей он будет использоваться. Поскольку светосиле придается особое значение, существует тенденция считать объективы с большими относительными отверстиями лучшими. Если не требуется очень высокая светосила, например 1:1,4, то имеет смысл выбрать объектив с доступной ценой и максимальным относительным отверстием 1:2.

"Зум-объектив (панкратический объектив) — объектив с переменным фокусным расстоянием — *Прим. Ред.*

Фотограф, выбирающий объектив при покупке, должен учитывать область фотографии, в которой он будет применяться (т. е. требования, предъявляемые к объективу). Большинство объективов не дают предельно резких изображений при максимальных и минимальных действующих отверстиях и лучше работают при средних значениях диафрагм. Обычно при полностью закрытой диафрагме характеристики объектива ухудшает дифракция, при полностью открытой — различные остаточные aberrации. Следовательно, если в условиях съемки не требуется использования объектива в этих двух экстремальных случаях, диафрагмирование должно использоваться в пределах средних значений диафрагм. Однако при уменьшении действующего отверстия объектива достигается увеличение глубины резко изображаемого пространства, а при увеличении — более яркое изображение на пленке.

Критерии качества объективов такие же, как при оценке характеристик пленки. Хорошо скорректированные объективы важны для успешной работы, их проверка осуществляется с использованием фотодетекторов или визуально при изготовлении и сборке объективов. Критерии формирования хорошего изображения излагаются в гл. 8, где рассматриваются типы пленок. Для

фотографа самой лучшей оценкой качества объектива является степень совершенства оптического изображения, которую данный тип объектива обеспечивает при фотографировании.

### Упражнения

- Нарисуйте схему, показывающую, как свет преломляется при прохождении границы раздела воздух — стекло, проходя из воздуха в стекло. Найдите угол преломления, если стекло имеет показатель преломления 1,5 и угол падения равен  $45^\circ$ .
- Если длина волны фиолетового света в вакууме равна 400 нм, то какова его частота? Какими будут длина волны и частота этого света при его прохождении через стекло?
- Перечислите в порядке увеличения длины волны следующие виды электромагнитного излучения: рентгеновское, видимое, гамма, инфракрасное, ультрафиолетовое, радио, микроволновое.
- Имеются следующие объекты: а) объект, расположенный от выпуклой линзы на расстоянии, равном двум фокусным расстояниям; б) объект, расположенный на расстоянии, равном половине фокусного расстояния; в) объект, расположенный от вогнутой линзы на расстоянии, равном двум фокусным расстояниям. Какие из них могут быть сфотографированы?
- Для фотографирования объекта, расположенного на расстоянии 100 мм от линзы, используется 50-мм выпуклая линза. Где формируется изображение?
- Используя чертежную бумагу, постройте ход лучей, которые образуют изображение объекта, расположенного на расстоянии 200 мм от положительной линзы с фокусным расстоянием 50 мм.
- Пользуясь определением толстой линзы, нарисуйте чертеж, показывающий, как определяется положение изображения для положительной линзы.
- Перечислите недостатки качества изображения, создаваемого обычной сферической линзой.
- Опишите линзу, полностью корректирующую бочкообразную и подушкообразную дисторсию.
- Покажите графически, как изменялась со временем практическая светосила объективов в ходе их усовершенствования. Дайте описание вашего графика.

## Глава 5. Применение оптики в фотографии

### Увеличение

В гл. 4 были рассмотрены устройство объективов и основные законы оптики, используемые при конструировании объективов; обсудим теперь некоторые проблемы, касающиеся непосредственно практики фотографирования. В определенных фотографических ситуациях полезно заранее знать размер изображения, образованного объективами различного типа. При рассмотрении размера изображения удобным параметром является *линейное увеличение*, определяемое как

$$m = i/o. \quad (5.1)$$

где  $i$  — высота изображения,  $o$  — высота объекта. Поверхностное увеличение равно квадрату линейного увеличения. В книге под термином «увеличение» будет подразумеваться линейное увеличение.

Удобно выражать увеличение через фокусное расстояние и расстояние до объекта, так как они могут выбираться фотографом. Из подобия треугольников на рис. 5.1 следует

$$m \sim ilo - viu. \quad (5.2)$$

из выражения  $l/w+l/v=l//$  можно найти  $v$  как функцию  $m$ . После преобразований получим  $m=f/(u-f)$ . (5.3) Если расстояние до объекта  $u$  много больше чем  $f$ , то

$$m \approx f/u. \quad (5.4)$$

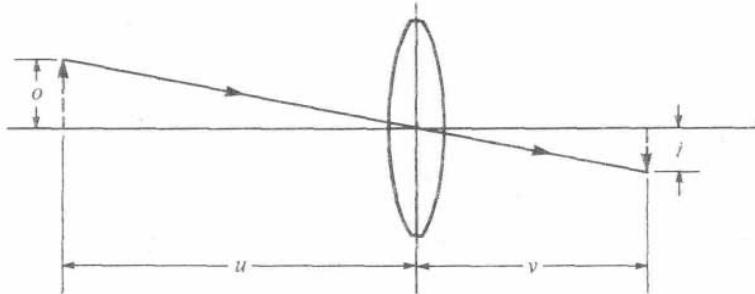


Рис. 5.1.

Предмет и его изображение в тонкой положительной линзе

Соотношение (5.4) позволяет удовлетворительно оценить размеры изображения во всех случаях, кроме *макрофотографии* (фотографии малых объектов), когда  $m$  приблизительно равно 1.

**Пример 5.1.** Предположим, что в

музее вы собираетесь сфотографировать некоторые скульптуры, используя 35-мм фотоаппарат. Было бы весьма полезным заранее знать, какой объектив обеспечил бы полное заполнение кадра и с какого расстояния при этом придется фотографировать, так как посещение музея запланировано

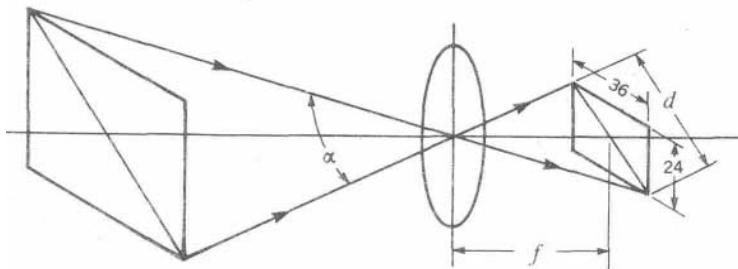
на субботу, когда он переполнен. Среди экспонатов музея есть копия скульптуры Родена «Бальзак», высота которой около 3 м. Так как 35-мм фотокамера имеет кадр размером 24x36 мм, максимальное увеличение, которое может быть получено, составляет  $t = 36 \text{ мм}/3 \text{ м} = 0,012$ .

Следовательно, отношение расстояния до объекта к фокусному расстоянию должно удовлетворять неравенству  $t/m < 0,012$ . Для объектива с фокусным расстоянием 50 мм находим  $m=50 \text{ мм}/0,012=4.2 \text{ м}$ . Для успешного фотографирования в указанных выше условиях необходимо проявить определенную сноровку и такт. Отметим, что в рассмотренном примере пренебрежение величиной  $t$  в знаменателе выражения (5.3) приводит к ошибке 1%.

### Угол поля изображения

Та часть сцены, которую можно запечатлеть на фотопленке, называется полем изображения. Иногда поле изображения удобно выражать величиной угла поля изображения  $a$ , что особенно полезно при работе с удаленными объектами, например при съемке ландшафтов.

Угол поля изображения в фотографии определяется как угол с вершиной в центре объектива, охватывающий диагональ снимаемой сцены, изображение которой заполняет все кадровое окно. Этот угол показан на рис. 5.2 для 35-мм фотоаппарата. Отметим, что фотографу часто полезнее знать вертикальный или горизонтальный угол, так как они дают более практическую информацию для фотографирования. Тем не менее большинство производителей теле- и фотообъективов настаивают на применении принципа диагонального измерения.



**Рис. 5.2.**

Зависимость между углом поля изображения объектива и размером кадра

Типичные значения углов поля изображения для некоторых объективов 35-мм фотокамер представлены в табл. 5.1.

**Таблица 5.1. Угол поля изображения объективов, используемых в малоформатных фотоаппаратах**

| Фокусное расстояние, мм.     | 28 | 55 | 105 | 200 |
|------------------------------|----|----|-----|-----|
| Угол поля изображения, град. | 75 | 43 | 23  | 12  |

Угол поля изображения объектива может быть вычислен из фокусного расстояния объектива / и величины диагонали кадра  $d$ . Исходя из рис. 5.2, можно получить  $\tan(a/2) = d/(2f)$ . Вертикальный угол  $a_v$  и горизонтальный угол  $a_h$  поля изображения могут быть вычислены аналогично, если использовать высоту и ширину кадра вместо его диагонали. Диагональ для формата 24x36 мм приблизительно равна 43 мм. Для объектива с фокусным расстоянием 55 мм получим  $a_v=24^\circ$  и  $a_h=36^\circ$ .

Угол поля изображения  $a$  приблизительно обратно пропорционален фокусному расстоянию объектива  $f$ . Если запомнить, что «стандартный» объектив 35-мм фотокамеры имеет угол поля изображения около  $45^\circ$ , то угол поля изображения всех других объективов может быть найден простой прикидкой по кратности увеличения фокусного расстояния. Из табл. 5.1 следует, что указанное соотношение между  $a$  и  $f$  выполняется тем точнее, чем больше  $f$ . Угол поля изображения объектива уменьшается при фокусировке фотоаппарата на ближайшие дистанции наводки, так как пленку при этом необходимо располагать дальше от объектива, чтобы получить резкое изображение. Это уменьшение угла поля изображения незначительно, кроме тех случаев, когда используется макрофотография.

Так называемый «стандартный объектив» представляет собой объектив, фокусное расстояние которого приблизительно равно диагонали кадра. Такой объектив должен был бы иметь поле изображения около  $53^\circ$  для 35-мм фотокамеры. В типичном 35-мм однообъективном зеркальном фотоаппарате, однако, используется стандартный объектив, имеющий немного большее фокусное

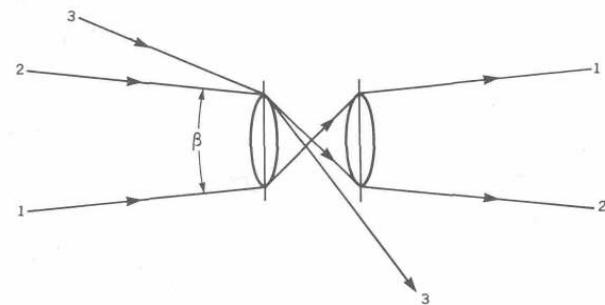
расстояние и, следовательно, немногим меньший угол поля изображения. Применение такого объектива позволяет получить максимальную светосилу при данной конструкции фотокамеры.

### Угол поля зрения

В предыдущем разделе был введен угол поля изображения и показано, что он определяется

размерами кадра и фокусным расстоянием, но это не всегда верно. Для идеализированной тонкой линзы (подобной применявшемуся в первых фотокамерах менисковому объективу) угол поля изображения будет определяться размерами пленки, расположенной позади объектива. Этот угол поля изображения может приближаться к  $180^\circ$ .

**Рис. 5.3.**  
Угол поля зрения



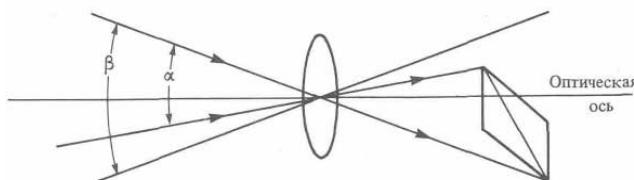
Однако для реального объектива, состоящего из нескольких пространственно разделенных элементов конечного размера (толстых линз), максимально достижимый угол поля изображения будет меньше, так как некоторые наклонные лучи, падающие на передний элемент, не попадут на второй элемент (луч 3 на рис. 5.3). Этот максимально достижимый угол поля изображения (угол между лучами 1 и 2) называется *углом поля зрения* (угол Р на рис. 5.3).

Если угол поля изображения объектива больше, чем угол поля зрения, то углы кадра не будут равномерно освещены, и изображение, как говорят, будет *виньетировано*. Правильно сконструированный объектив не дает значительного виньетирования.

Из рис. 5.4 видно, что угол поля зрения |3| должен быть больше угла поля изображения  $\alpha$ , определяемого размером кадра, в том случае, если кадр сдвинут относительно оси, как это иногда случается в фотоаппаратах с видоискателями (вследствие эффекта параллакса, см. гл. 2).

**Пример 5.2.** Предположим, что у нас есть складная фотокамера 4x5 дюймов (101x127 мм) со стандартным объективом ( $f = 165$  мм). Этот объектив имеет угол поля зрения  $100^\circ$ . Как далеко может быть сдвинут центр фотопластиинки относительно оптической оси, чтобы фотопластиинка оставалась полностью освещенной?

Так как стандартный объектив имеет угол поля изображения  $53^\circ$ , то смещение может быть произведено в пределах угла  $100 - 53 = 47^\circ$ . Этот угол определяет полное (по обе стороны от оптической оси) диагональное смещение. Таким образом, диагональное смещение по одну сторону от оптической оси должно быть ограничено углом  $47^\circ/2 = 23,5^\circ$ .



**Рис. 5.4.**  
Соотношение между углом поля зрения и углом поля изображения

Допустимое диагональное смещение при фотографировании предметов на значительном расстоянии будет равно 165

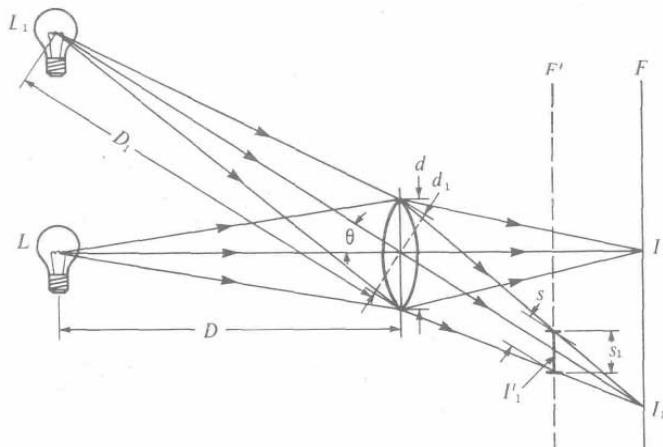
$[\tan(100^\circ/2) - \tan(53^\circ/2)] = 144$  мм. Читатель, используя простое геометрическое построение, легко сможет определить, что смещение вдоль пятидюймовой стороны кадра составляет 5 дюймов (127 мм), а вдоль четырехдюймовой стороны — 5,3 дюйма (134 мм).

### Равномерное освещение кадра

Предполагается, что освещенность изображения является одинаковой для всего поля изображения. Вообще говоря, это неверно. В простейшем случае тонкой линзы возникают три эффекта, уменьшающие освещенность углов поля изображения по сравнению с центром.

Первый эффект состоит в том, что освещенность пленки в точках, находящихся вне оптической оси, уменьшается вследствие увеличения расстояния от плоскости объекта до объектива. Этот эффект является следствием действия закона обратных квадратов (гл. 2). При движении предмета к периферии поля изображения объектива создается впечатление удаления его от объектива. На рис. 5.5 расстояние  $f_p$ , очевидно, больше, чем  $D$ . Этот эффект пропорционален  $\cos^2 \theta$ .

Второй эффект является результатом того, что плоскость диафрагмы объектива не перпендикулярна осевому лучу из точки  $L$ . Таким образом, эффективный диаметр уменьшается от  $d$  до  $d_t$ . С ростом угла  $\theta$  количество света, проходящего через линзу, уменьшается пропорционально  $\cos \theta$ . Количество света, проходящего через линзу, будет равно нулю, когда  $\theta = 90^\circ$ .



Третий эффект возникает вследствие того, что плоскость пленки не перпендикулярна осевому лучу из точки  $L$ . Лучи света, испускаемые точечным источником  $L$  (рис. 5.5), образуют в плоскости  $F'$ , лежащей перед фокальной плоскостью  $F$ , пятно

Рис. 5.5.

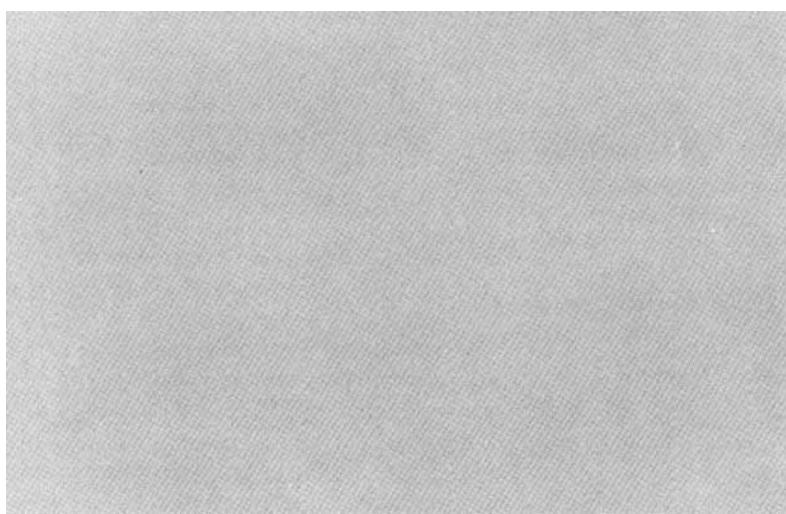
Уменьшение освещенности изображения / при смещении источника  $L$  относительно оптической оси

света в форме круга. Изображение // для  $L_1$  будет эллипсом, большая ось которого в плоскости рисунка равна 5<sub>1</sub>, причем она больше диаметра 5 пятна

света в // . Размер эллипса в плоскости, перпендикулярной рисунку, равен диаметру светового пятна. Таким образом, энергия точечного источника света распределяется на большую площадь. Аналогичное явление наблюдается и в плоскости пленки  $F$  (изображения / и //). Уменьшение освещенности в // пропорционально  $\cos \theta$ .

Общий эффект уменьшения освещенности изображения, находящегося вне оптической оси, пропорционален  $\cos^4 \theta$ . Современные объективы не создают значительного затемнения на краях изображения благодаря специальным мерам предосторожности, предпринимаемым для ослабления рассмотренных эффектов. Следует ожидать, что широкоугольные объективы будут приводить к значительному затемнению краев кадра. Однако широкоугольные объективы обычно имеют короткое фокусное расстояние и конструируются так, чтобы устранить этот недостаток. Например, если используется 28-мм объектив в 35-мм однообъективном зеркальном фотоаппарате для фотографирования равномерно освещенной поверхности, то освещенность углов должна была бы быть меньше половины освещенности в центре. Это означает, что экспозиция углов будет на одну ступень меньше по сравнению с экспозицией центра кадра. Отпечаток с такого негатива должен был бы иметь значительные затемнения по углам, хотя на рис. 5.6 затемнения нет.

Сфотографированный объект (открытое небо) обладал равномерностью освещенности в пределах  $\pm V_6$  ступени.



При использовании фотографом складного фотоаппарата, в котором оптическая ось объектива не обязательно проходит через центр фотопластинки, объектив должен быть сконструирован так, чтобы его угол поля зрения был приспособлен к возможному смещению фотопластинки относительно оптической оси объектива.

Рис. 5.6.

Фотография равномерно освещенного поля, полученная с помощью современного широкоугольного объектива (ЭНМ, 1983 г.).

### Телеконвертер

Для расширения возможностей существующих объективов при минимальном увеличении их стоимости применяют телеконвертер, который увеличивает фокусное расстояние системы (за счет уменьшения светосилы, конечно). Например, двукратный 2X-телеконвертер увеличивает фокусное расстояние объектива в два раза и уменьшает относительное отверстие на две ступени диафрагмы. К сожалению, оптическое качество всей системы заметно ухудшается, особенно если телеконвертер не сконструирован специально для определенного типа объектива.

**Пример 5.3.** Пусть 2X-телеконвертер используется с фотообъективом, имеющим фокусное расстояние 135 мм и максимальное относительное отверстие 1:3,5. Новая система обладает

эффективным фокусным расстоянием 270 мм с относительным отверстием 1:7 и функционирует довольно хорошо. Сочетание того же самого конвертера и 55-мм объектива с относительным отверстием 1:1,8 не дает удовлетворительного результата, поскольку заметно уменьшается резкость изображения. Этот телеконвертер не вполне подходит и для 550-мм объектива с относительным отверстием 1:6,3, так как он вызывает значительное виньетирование, хотя центр поля изображения воспроизводится вполне удовлетворительно. В последнем случае система будет обладать фокусным расстоянием 1000 мм с относительным отверстием 1:12,6. Отметим, что, хотя фокусное расстояние возросло в два раза, максимальная освещенность пленки уменьшилась в четыре раза.

### **Макрофотография**

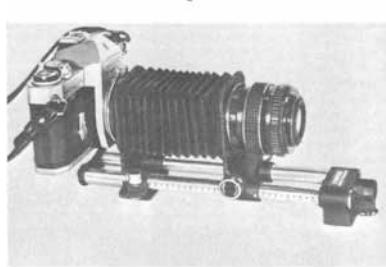
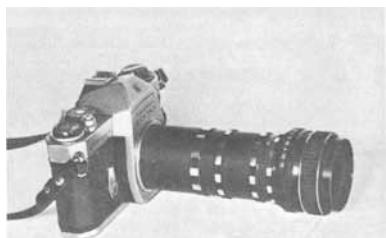
Фотографирование объектов, размеры которых приблизительно равны размерам кадра фотоаппарата (увеличение порядка единицы), называется *макрофотографией*. Этот вид фоторабот может быть весьма увлекательным занятием, причем для него требуется очень мало дополнительного оборудования. Однако существует много тонкостей, которые необходимо знать. Предположим, что некоторый объект должен быть сфотографирован в натуральную величину. В этом случае увеличение  $m$  равно единице и расстояния до изображения и объекта должны быть равны между собой ( $v = u$ ). Используя равенство  $1/w + 1/v = 1/f$ , найдем, что  $2/v = 1/f$  и  $v = u = 2f$ . Если в 35-мм фотоаппарате используется 55-мм объектив, полученный результат означает, что расстояние до объекта должно быть примерно равно 10,16 см и пленка должна быть расположена на таком же расстоянии позади задней главной плоскости объектива. Среднеформатные фотокамеры не могут обеспечить такое расположение, но существуют специальные устройства, помещение которых между объективом и самой камерой позволяет достигать качественного фокусирования. К таким приспособлениям относятся *промежуточные (удлинительные) кольца, раздвижной (удлинительный) мех и оборачивающее кольцо*. Примеры их использования с 35-мм однообъективным зеркальным фотоаппаратом показаны на рис. 5.7. Непрерывный интервал увеличений, вплоть до двухкратного, можно получить, используя стандартный объектив 35-мм фотоаппарата с набором из четырех удлинительных колец (рис. 5.7,а) различной длины. Общая длина набора составляет около 100 мм.

При использовании фотоаппарата без колец непрерывный интервал увеличений от максимального значения (около 0,15) до 2 может быть достигнут с помощью удлинительных колец в соответствующих комбинациях. Эти кольца часто конструируют так, чтобы сохранить работоспособность «прыгающей диафрагмы» в объективе, что весьма удобно, особенно для фотографов, привыкших к применению такой диафрагмы. В ситуации, когда необходимо большое увеличение, используют раздвижной мех (рис. 5.7,б). Однако в сочетании со стандартными объективами он не может давать увеличения много меньше единицы, поскольку его минимальная длина составляет около 50 мм.

Увеличение около  $U_2$  может быть достигнуто применением оборачивающего кольца (рис. 5.7,в) со стандартными объективами. Это кольцо имеет наружную резьбу с обоих концов, и поэтому объектив может быть соединен с корпусом фотоаппарата так, что его задняя сторона будет обращена к объекту съемки<sup>1</sup>). К недостаткам такого кольца следует отнести то, что, во-первых, оно позволяет получить только одно постоянное увеличение, и, во-вторых, невозможно использовать автоматическую «прыгающую диафрагму» объектива. Увеличение при обратном расположении объектива определяется механической и оптической асимметрией объектива, а также конечной шириной оборачивающего кольца. Нормальные объективы не предназначены для фокусирования на близкие предметы, и использование такого объектива для макрофотографии с оборачивающим кольцом приводит к улучшению оптического качества полученного изображения (рис. 5.7,в).

В некоторых случаях, с удлинительными кольцами могут быть использованы объективы, имеющие другие фокусные расстояния. Например, телеобъектив с фокусным расстоянием 135 мм в сочетании с набором удлинительных колец, указанных выше, дает максимальное увеличение около единицы. Преимуществом такого использования является увеличение рабочего расстояния, которое может быть особенно полезным при съемках с плохим освещением.

<sup>1</sup>> Если камера имеет байонетное крепление оптики, то одна из сторон оборачивающего кольца снабжена не резьбой, а соответствующим байонетом. — Прим. ред.



б

Рис. 5.7.

Приспособления, применяемые совместно с малоформатной однообъективной зеркальной фотокамерой в макрофотографии удлинительные кольца (а), раздвижной мех (б), оборачивающее кольцо (в) специальный макрообъектив с фокусным расстоянием 100 мм (г) (ЭНМ, 1983 г.)

Из выражения (5.4) можно сделать вывод, что выигрыш в рабочем расстоянии ведет к проигрышу в увеличении. В рассматриваемом случае это выражение неприменимо и увеличение надо вычислять по формуле (5.3). Например, при использовании объектива с фокусным расстоянием 100 мм при  $m = 0,5$  расстояние от объекта до плоскости пленки составляет около 44 см, для объектива с фокусным расстоянием 55 мм при таком же увеличении это расстояние примерно равно 27 см

Короткофокусные широкоугольные объективы могут давать большие увеличения. Для этого необходимо использовать оборачивающее кольцо вместе с удлинительными кольцами. У большинства этих объективов главные плоскости расположены либо у заднего конца объектива, либо вообще вне его (см. рис. 4.24).



в



г

Сочетание короткого фокусного расстояния и асимметрии объектива приводит к тому, что рабочее расстояние от передней части объектива становится очень малым. Оборачивающее кольцо удлиняет рабочее расстояние и в некоторых случаях улучшает оптические свойства объектива. Используя с 28-мм объективом удлинительные кольца и оборачивающее кольцо, можно достичь максимального увеличения около шести. Оборачивающее кольцо в комбинации с набором удлинительных колец и 55-мм объективом дает максимальное увеличение около 2,5. Оборачивающее кольцо редко используется с телеобъективами, так как главные плоскости у них находятся перед объективом (рис. 4.23).

Для макрофотографии можно применять специальные объективы, называемые макрообъективами (рис. 5.7, г). Главное различие между макрообъективом и обычным объективом состоит в расширенном рабочем диапазоне, в котором каждый объектив может быть сфокусирован. Хороший макрообъектив — это не просто стандартный объектив, смонтированный в удлиняемом корпусе, поскольку его оптика сконструирована так, что он может удовлетворительно

функционировать во всем расширенном диапазоне. Типичный макрообъектив для 35-мм однообъективного зеркального фотоаппарата имеет фокусные расстояния от 50 до 100 мм и максимальное относительное отверстие около 1:4. Такой объектив пригоден для работы при увеличениях приблизительно до 0,5. Для расширения интервала увеличений можно использовать мехи или удлинительные кольца. В последнее время были разработаны объективы, в которых сочетаются свойства макрообъективов и панкрайтические свойства. Некоторые из них функционируют очень хорошо, однако имеют слишком большие размеры.

В макрофотографии иногда используется понятие *уменьшение* объектива, представляющее собой обратную величину увеличения ( $\varepsilon = 1/m$ ). Корпуса макрообъективов и макропанкрайтических объективов часто маркируют серией чисел обычно в интервале 2—25. Эти числа обозначают уменьшение, если объектив сфокусирован на указанное расстояние.

**Пример 5.4.** Имеется 100-мм макрообъектив с относительным отверстием 1:4, который при фокусировании на объект, находящийся на расстоянии 45 см от плоскости пленки, дает уменьшение 2. Тот же самый объектив при фокусировании на объект, расположенный на расстоянии около 63 см от плоскости пленки, дает уменьшение 4. Определить размер изображения относительно размера объекта в каждом из этих случаев.

В первом случае увеличение равно  $V_2$ , так что размер изображения составляет половину размера объекта. Во втором случае увеличение равно  $V_4$  и размер изображения составляет  $V_4$  размера объекта.

Выше было показано, что значение относительного отверстия представляет собой точную меру светосилы объектива в предположении, что плоскость изображения расположена от объектива на расстоянии, сравнимом с фокусным расстоянием объектива. Так как в случае макрофотографии последнее условие не выполняется, необходимо вносить коррекцию в значение относительного отверстия, чтобы определить точную величину светосилы объектива. Корректирующий коэффициент, который должен быть введен, называется *фактором растяжения*. Эффективное значение диафрагменного числа //эфф определяется как  $\text{//эфф} = \frac{D}{v}$ , (5.5)

Так как, согласно уравнениям (5.2) и (5.3), увеличение  $m = v/u = f/(u-f)$  и  $\beta = f/D$ , из уравнения (5.5) можно получить Ч

$$/Y_3\phi\phi = (t + 1) // . \quad (5.6)$$

Корректирующий коэффициент (фактор растяжения) равен  $m - 1$ , и итоговый результат состоит в том, что диафрагменное число надо умножить на этот коэффициент, а светосилу объектива — на  $Y(m + 1)^2$ . При использовании экспонометра для измерения света, падающего на объект или отраженного от него, необходима коррекция полученных экспозиций для того, чтобы скомпенсировать потери в светосиле объектива.

**Пример 5.5.** Надо сделать серию цветных фотоснимков небольших цветков цинии, передающих индивидуальные детали цветка. Фотографирование проводится при дневном свете с использованием удлинительных колец и стандартного объектива малоформатного однообъективного зеркального фотоаппарата. Какова должна быть экспозиция, если размер изображения равен размеру объекта<sup>9</sup>

Чтобы быть уверенным в том, что увеличение будет равно единице, сравним размер изображения с размером кадра и установим фотоаппарат так, чтобы размер изображения равнялся размеру объекта, когда изображение сфокусировано. Так как съемка проводится при дневном свете и пленка имеет светочувствительность 64 единицы ASA, необходимая экспозиция пленки равна 1/60 с при диафрагме 16. В результате выдвижения объектива установка диафрагменного числа 16 приведет к уменьшению количества света по сравнению со съемкой в аналогичных условиях бесконечно удаленного объекта. Эффективное значение диафрагмы//эфф должно составлять 16. Так как  $m = 1$ , используя выражение (5.6), найдем, что исправленное диафрагменное число будет равно  $16/2 = 8$ . Другими словами, кольцо диафрагмы объектива должно быть установлено на диафрагму 8, чтобы получить ту же самую экспозицию пленки, что и при диафрагме 16, когда фотографируется обычный объект при той же освещенности.

Можно избежать этих математических трудностей, если проводить измерение света через объектив (система TTL). Во многих случаях эта система вполне работоспособна, однако необходимо сказать несколько слов о возможных трудностях. В большинстве фотоаппаратов, использующих систему TTL, светочувствительный элемент расположен так, чтобы измерять яркость на пленке или в некоторой равнозначной позиции. В

') //Эфф=y/f = (y//)//, но  $m(u-f)=f$ ,  $mu=mf+f$ , //Эфф=(Дт+1)/)/=/(п2 + 1)/

большинстве фотоаппаратов измеряется яркость изображения на матовом стекле под пентапризмой. В таких фотоаппаратах использование удлинительных колец не приводит к ошибкам в показаниях экспонометра. В некоторых конструкциях фотоаппаратов светочувствительные элементы для измерения света расположены в *выходном зрачке*<sup>1^</sup> положение которого изменяется с добавлением удлинительных колец, поэтому измерения будут ошибочными. Чтобы проверить, можно ли использовать систему TTL для измерения освещенности при макросъемке, необходимо воспользоваться серой картой с 18%-ным коэффициентом отражения, выражением (5.6) для определения корректирующего фактора и правильно калиброванным по отраженному свету экспонометром.

Более существенно для макросъемки, что большинство объектов для нее являются нестандартными, т. е. имеют средний коэффициент отражения, отличающийся от 18%. Поэтому при измерении экспозиции методом отраженного света (по яркости) целесообразнее пользоваться замером отраженного света не от объекта, а от контрольной серой карты с отражением 18%.

Кроме того, объекты в макрофотографии часто неравномерно освещены, поэтому надежнее делать замер экспозиции по падающему излучению (по освещенности) и вводить поправку на коэффициент, связанный с масштабом съемки.

Системы замера экспозиции в современных малоформатных однообъективных зеркальных

камерах часто работают при полностью открытой диафрагме, для чего в механизме предусмотрен специальный рычажок, связывающий объектив с корпусом камеры. Некоторые типы удлинительных колец такого рычажка не имеют, и экспонометр, если поставить их на камеру, будет работать неправильно. В этих случаях придется пользоваться отдельным ручным экспонометром.

Вместо устройств для макросъемки, о которых говорилось выше, для этих же целей часто применяются насадочные линзы. Такие линзы, имеющие положительную оптическую силу, устанавливаются перед объективом фотокамеры. Общее фокусное расстояние системы становится меньше по сравнению с фокусным расстоянием объектива. Задняя главная плоскость всей комбинации сдвигается вперед относительно задней главной плоскости одного объектива фотоаппарата, что существенно увеличивает расстояние до изображения  $v$ . Так как положение пленки относительно объектива не изменяется, фотоаппарат можно фокусировать на предметы, находящиеся ближе к объективу (величина  $v$  уменьшается), и, значит, увеличение ( $m = v/u$ ) возрастает. Главным недостатком применения насадочных линз является ухудшение оптических качеств изображения вследствие, как правило, значительных aberrаций у этих линз. Они не обладают хорошей коррекцией и, даже если и являются просветленными, на пути лучей в них добавляются две поверхности.

\* См разд. «Словарь терминов» — Прим. перев

Насадочные линзы обычно маркируют в диоптриях, а не в фокусных расстояниях. *Оптическая сила*  $d$  линзы равна обратной величине фокусного расстояния, выраженного в метрах.

Собирающая (положительная) линза должна быть маркирована в положительных диоптриях, а рассеивающая (отрицательная) — в отрицательных диоптриях. Если две линзы с оптической силой 1 и 2 диоптрии расположить в контакте между собой, то их комбинация будет вести себя как одна линза с оптической силой 3 диоптрии<sup>1\*</sup>. В данном примере линза с фокусным расстоянием 0,5 м была скомбинирована с линзой, фокусное расстояние которой равно 1 м, и фокусное расстояние комбинации линз составляет 0,33 м.

Возникает вопрос: уменьшается ли светосила объектива в результате применения насадочных линз? Вспомним, что относительное отверстие объектива равно отношению фокусного расстояния объектива / к диаметру действующего отверстия диафрагмы<sup>2</sup>  $D$ . Для объектов, расположенных близко к фотоаппарату, эффективное значение относительного отверстия есть //эфф =  $v/D$ . На практике каждый может определить, что //эфф увеличивается при добавлении насадочной линзы, поскольку  $v$  незначительно увеличивается, а  $D$  уменьшается. Например, при добавлении насадочной линзы с оптической силой 1 диоптрия к типичному объективу фотоаппарата с фокусным расстоянием 55 мм примерно на 5% увеличивается относительное отверстие объектива при фокусировании на объект, расположенный на расстоянии около 30 см перед фотоаппаратом. Такое изменение проявляется в уменьшении светосилы объектива приблизительно на 10%, что относительно невелико по сравнению с уменьшением действующего отверстия на половину ступени шкалы диафрагменных чисел, которое приводит к 30%-ному ослаблению светосилы объектива. Экспериментальная проверка уменьшения светосилы с помощью экспонометра, встроенного в однообъективный зеркальный фотоаппарат, показала, что наблюдаемое ослабление составляет немного меньше чем 15%. Этот факт объясняется дополнительными потерями света вследствие его отражения от непросветленной насадочной линзы.

#### Применение насадочных линз не влияет на показания

<sup>1</sup> Это правило применимо только для тонких линз, находящихся в контакте. В более общих случаях суммарное фокусное расстояние / двух простых линз с фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$ , расположенных на расстоянии  $s$  друг от друга, равно  $f = f_1 f_2 / (f_1 + f_2 - s)$ . Если  $s=0$ , то выражение может быть упрощено до  $f = f_1 f_2 / f_1 + f_2$ , и если  $d$  — оптическая сила, то  $d = d_1 + d_2$ .

<sup>2</sup> В общем случае использование диаметра *входного зрачка* предпочтительнее, чем диаметра диафрагмы, поскольку последняя сама определяется значением относительного отверстия. См. разд. «Словарь терминов». — Прим. перев.

встроенного экспонометра; следовательно, он может быть использован для определения экспозиции, но при этом необходимо помнить об указанных ранее ограничениях.

Объектив, в котором может смещаться передний элемент относительно заднего элемента, называется объективом с фокусирующим передним элементом и часто используется в не очень дорогих камерах. Фокусирование в этих объективах достигается путем изменения его фокусного расстояния. Так как при этом расстояние между линзами растет (см. сноску 1 на с. 39), фокусное расстояние объектива и расстояние до объекта растут, поскольку расстояние до изображения фактически остается постоянным. Относительное отверстие такого объектива не будет изменяться так же сильно, как меняется расстояние до объекта, по причинам, подробно рассмотренным при обсуждении насадочных линз.

#### Бипризма Френеля

Как указывалось в гл. 2, одна или несколько бипризм Френеля используются как вспомогательное средство для фокусировки во многих однообъективных зеркальных фотоаппаратах.

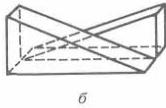


Рис. 5.8.

Бипризма Френеля (а) и фокусирующее устройство на ее основе (б).

Рис. 5.9.

Принцип работы фокусирующего устройства на основе бипризмы Френеля, вмонтированной в матовое стекло: а — изображение не в фокусе, б — изображение в фокусе.

Бипризма Френеля состоит из двух стеклянных призм, соединенных боковыми сторонами (рис. 5.8,а).

Чтобы понять принцип работы бипризмы в фокусирующем устройстве фотоаппарата (рис.

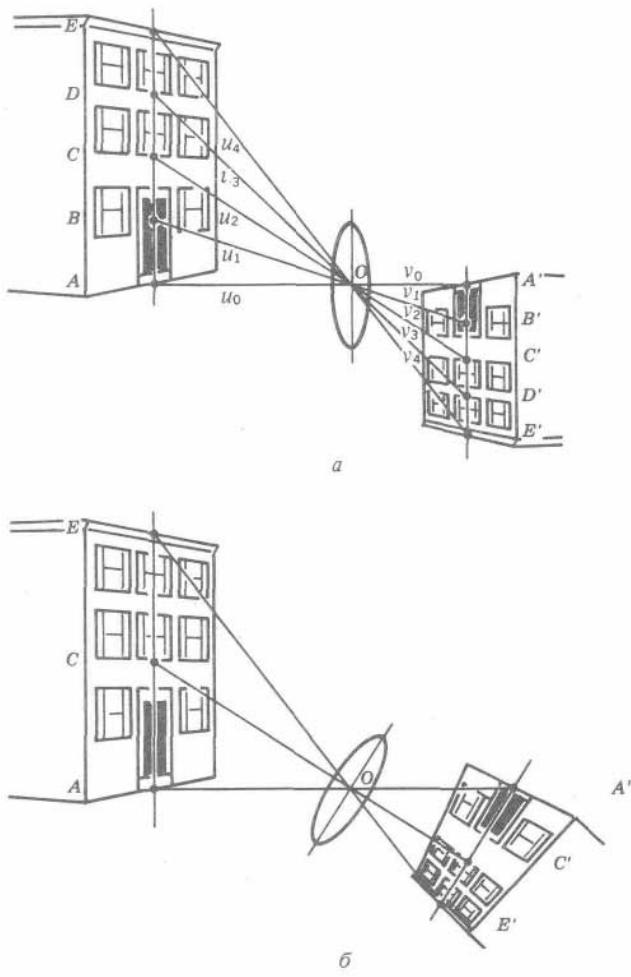
2.8), представим себе две призмы, расположенные бок о бок друг с другом, как показано на рис. 5.8,5. Эти призмы вклеены в центр матового экрана, как на рис. 5.9. Если изображение не сфокусировано на матовом стекле, то и изображение в центре бипризмы будет расщепленным (рис. 5.9,а), потому что задняя призма смещает изображение вправо, а передняя — влево. Изображение, образованное передней призмой, соответствует верхней половине объекта (рис. 2.8). Если изображение на матовом стекле сфокусировано, то изображения в центре бипризмы будут совпадать. Некоторые фокусирующие устройства состоят из многих маленьких бипризм, расположенных в центре матового экрана (микрорастров). Каждая бипризма функционирует аналогично одной, уже рассмотренной, бипризме.

Несфокусированное изображение на экране с микрорастром будет казаться мерцающим и неоднородным.

#### Сохранение архитектурных пропорций

Большинство фотографов замечают, что при фотографировании высоких зданий, основание которых находится на одном уровне с фотографом, на фотографии параллельные стороны здания выглядят сходящимися к одной точке.

Рис. 5.10.



Соотношение между объектом и его изображением при фотографировании архитектурных сооружений.

Этот эффект возникает и в случае рассматривания высокого здания. С другой стороны, существуют фотографии архитектурных сооружений, на которых стены кажутся параллельными. Этого можно достичь, если при фотографировании плоскость фотопленки сохранялась параллельной плоскости здания. Это утверждение может быть проверено на основе геометрических построений и соотношений подобия при увеличении. Стороны получатся параллельными, если увеличение в горизонтальном направлении будет таким же, как и в вертикальном направлении.

На рис. 5.10,а показан фотографируемый фасад здания. Вспоминая, что  $m = v/u$ , имеем  $m_1 = v_1/w_1, \dots, m_4 = v_4/w_4$ . Так как треугольник  $BOA$  подобен треугольнику  $B'OA'$  и треугольник  $COA$  подобен  $C'OA'$  и так далее, получим  $v_1/u_1 = v_0/u_0, v_2/u_2 = v_0/u_0$ . Следовательно,  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4$ .

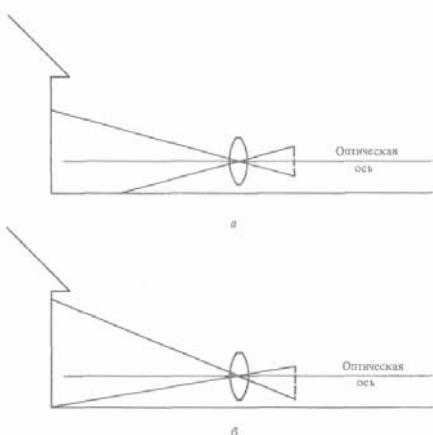
Так как увеличение всюду одинаково, ширина изображения также будет одинакова по всем высотам, и, значит, стороны здания будут параллельны. Если пленка наклонена (рис. 5.10,б), то треугольник  $AOE$  не будет подобен  $A'OE'$  и га  $\phi m_4$ .

При использовании стандартного малоформатного фотоаппарата с пленкой, параллельной фасаду здания, большая часть поля изображения будет занята передним планом (рис. 5.11, а) и часть здания не попадет в кадр. Из рис. 5.11, б видно, что сдвиг пленки вниз относительно оптической оси делает возможным

фотографирование всего здания целиком при сохранении архитектурных линий передней части здания. Для этих целей предпочтительнее использовать складной фотоаппарат, который допускает вертикальное смещение объектива относительно кассеты с пленкой. При работе с однообъективными зеркальными камерами для этой цели служат специальные сменные объективы, называемые *шифт-объективами* или *объективами с контролем перспективы*. Такие объективы можно смещать по вертикали относительно фотоаппарата.

**Рис. 5.11.**

Возможность смещения кассеты с фотопленкой относительно оптической оси при фотографировании архитектурных сооружений.



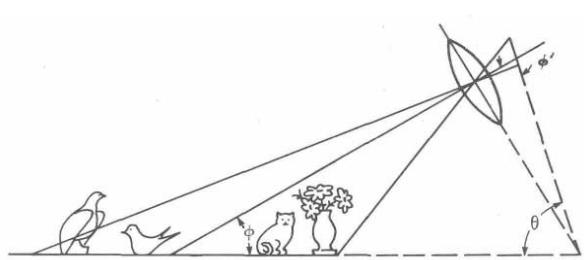
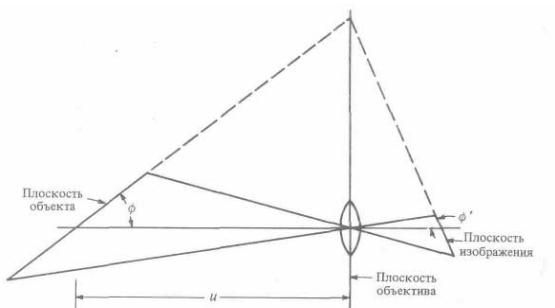
### Фотографирование объектов, не перпендикулярных оптической оси

Павильонные аппараты (но отнюдь не шифт-объективы) конструируют так, чтобы плоскости объективной доски и пленки можно было поворачивать на шарнирах вокруг осей, перпендикулярных оси фотоаппарата. Такие повороты делают возможной фокусировку объектов, лежащих в плоскостях, не перпендикулярных оптической оси объектива. Вращение вокруг горизонтальной оси называется *наклоном*, вращение около вертикальной оси называется

*поворотом*. Можно показать, что если плоскость объекта наклонена на угол  $\phi$  относительно оптической оси (рис. 5.12), то изображение будет сформировано в плоскости, находящейся под углом  $\phi'$  относительно оптической оси, а продолжения этих плоскостей будут пересекаться по линии, лежащей в плоскости объектива.

**Рис. 5.12.**

Взаимосвязь между плоскостями объекта и изображения при неперпендикулярном положении объекта относительно оптической оси.



оптической оси объектива  $\phi'$  равен  $70^\circ$  (он ограничен «поворотом» фотоаппарата и углом зрения объектива), то каким должен быть угол между оптической осью и плоскостью стола  $\phi$ ?

$$\tan \phi = \frac{1}{\tan \phi'} = \frac{1}{\tan 70^\circ} = 0,549,$$

откуда  $\phi \approx 29^\circ$ .

**Рис. 5.13.**

Фотографирование группы небольших предметов, расположенных на столе.

**Пример 5.6.** Рассмотрим проблему фотосъемки группы небольших статуэток, расположенных на столе (рис. 5.13). Расстояние до центра стола равно 36 дюймов (91,5 см), фокусное расстояние объектива равно 6 дюймов (15,2 см). Если угол наклона кассеты с пленкой относительно

угла  $\phi$  равен  $70^\circ$  (он ограничен «поворотом» фотоаппарата и углом зрения объектива), то каким должен быть угол между оптической осью и плоскостью стола  $\phi$ ? Тот факт, что плоскости объекта, изображения и объектива пересекаются на одной прямой, оказывает большую помощь при композиции такого вида фотографий.

### Восприятие перспективы

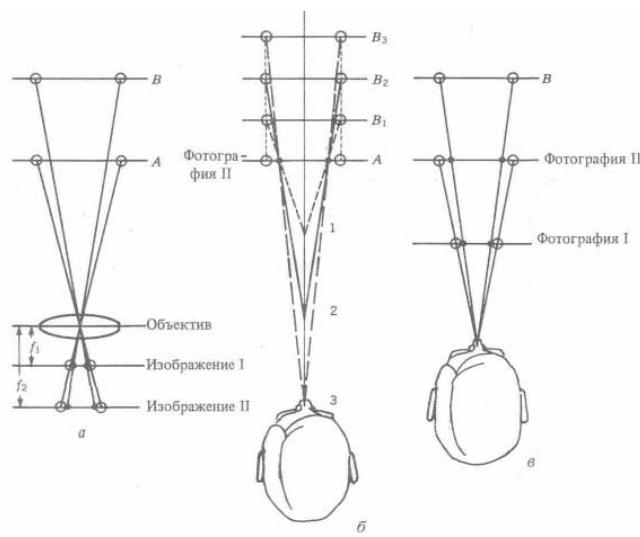
Фотоаппарат запечатлевает в виде плоского изображения объекты, которые обычно имеют три измерения. Когда рассматривается фотография, человеческий мозг реконструирует объемное впечатление от объекта. И не всегда это объемное представление согласуется с реальностью. Почему так происходит?

При рассматривании фотографии прикладывается усилие, чтобы мысленно создать картину, совпадающую с реальностью. В качестве примера рассмотрим, что произойдет, когда фотографируется квадратная беседка, поддерживаемая четырьмя опорами одинакового размера. План этой фотографической ситуации представлен на рис. 5.14, а. Для формирования изображения используются два разных объектива с фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$ . Предположим, что  $f_2 = 2D$ . После

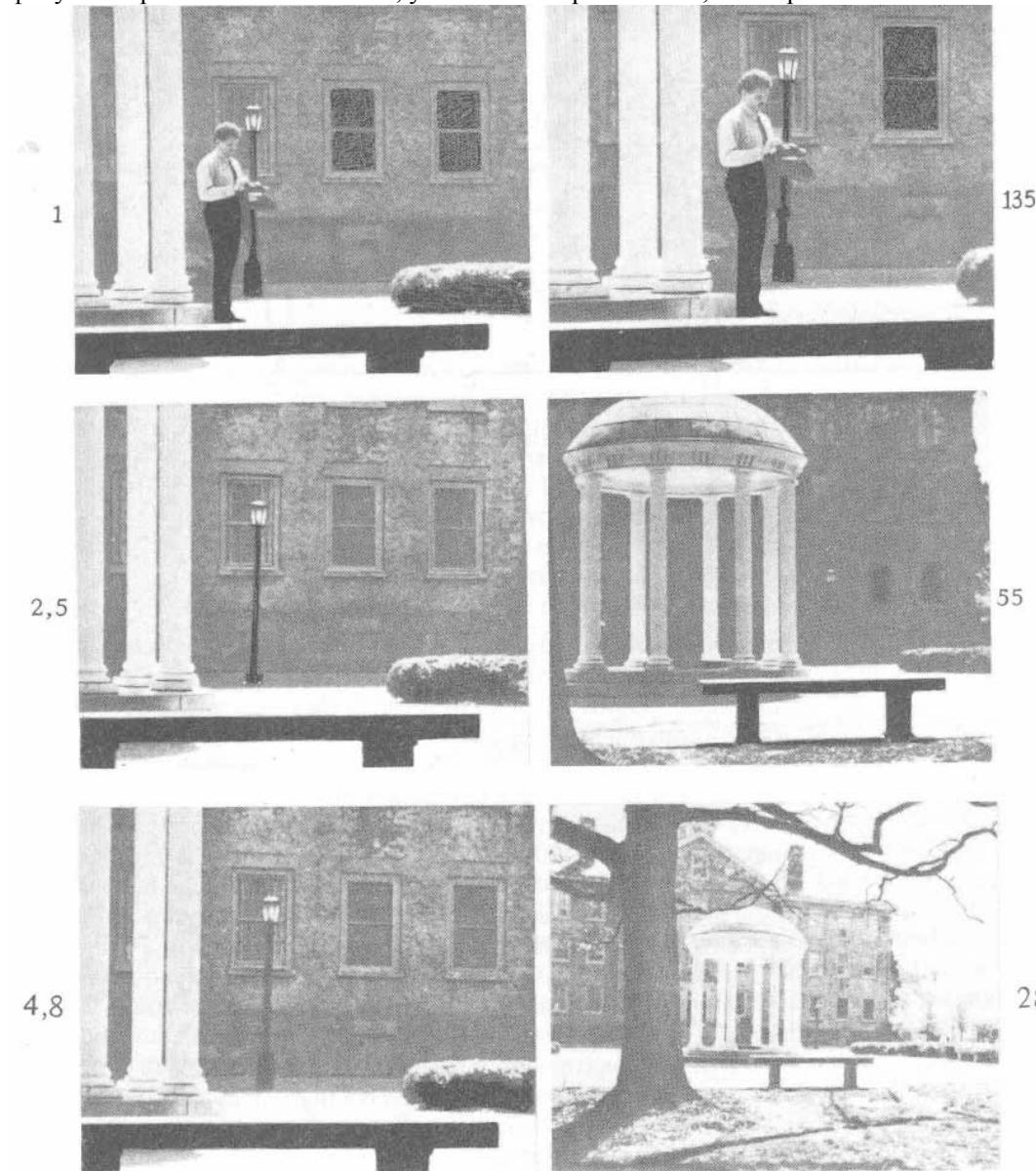
Рис. 5.14. Восприятие перспективы на двумерном

изображении

увеличения на фотографии будет получено изображение II, на котором можно увидеть четыре опоры, находящиеся в одной плоскости. Наблюдателю будет казаться, что внешние столбы имеют больший размер, чем внутренние. Однако он понимает, что все опоры должны быть одинакового размера и что расстояние между внешними и внутренними опорами также должно быть одинаковым. Наблюдатель сделает вывод, что внутренняя пара опор должна быть дальше, и сконструирует объемное изображение (рис. 5.14, б). Если глаза наблюдателя находятся вблизи точки 1, то реконструкция представляет собой широкую и неглубокую беседку (опоры в плоскостях  $A$  и  $B^1$ ). Если они будут вблизи точки 3, то беседка будет относительно глубокой и узкой (опоры в плоскостях  $A$  и  $B_3$ ). И только из точки 2 беседка будет представляться квадратной (опоры в плоскостях  $A$  и  $B_2$ ). Следовательно, в восприятии беседки играет роль расстояние, с которого рассматривается фотография. Только одна точка наблюдения приводит к реконструкции изображения, соответствующего реальности.



На изображении I, полученном с тем же увеличением, интервал между опорами будет равен половине интервала на изображении II. Рассматривая картину I на вдвое меньшем расстоянии, чем то, которое использовалось для картины II, получим реконструированное изображение беседки (рис. 5.14,в). Если увеличение изображения I равно двум увеличениям изображения II, то обе картинки будут одинакового размера, и истинная перспектива сохранится, если эти картинки рассматривать с того же самого исправленного расстояния. Следовательно, сохранение истинной перспективы зависит от фокусного расстояния объектива, увеличения и расстояния, с которого

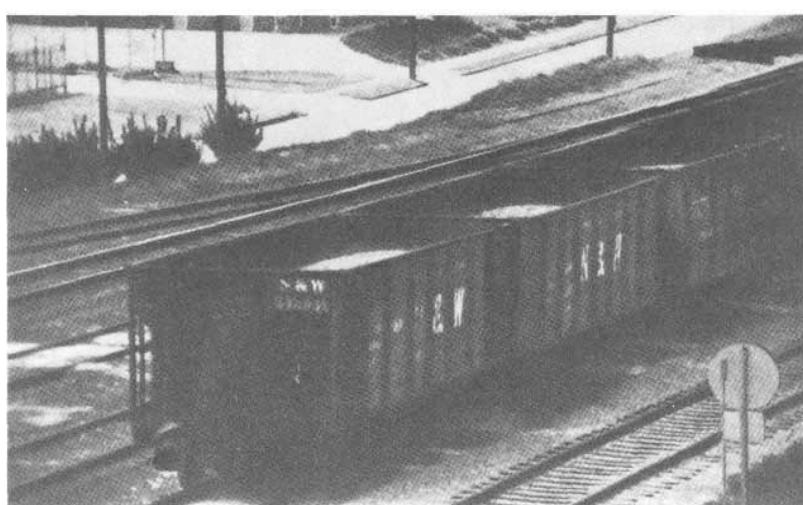


**Рис. 5.15.**  
Фотографии,  
снятые  
различными  
объективами и  
отпечатанные  
с различным  
увеличением  
(ЭНМ 1983 г.)

рассматривается эта картинка. Что касается перспективы, то увеличение размеров отпечатка равнозначно использованию объектива с более длинным фокусным расстоянием (рис. 5.15). Три фотографии справа сняты с одной и той же позиции с использованием трех разных объективов. Фотографии получены с одинаковым увеличением. Отметим различное восприятие перспективы в

каждом случае. Слева представлены фотографии, полученные увеличением центральной части каждой правой фотографии до такой степени, чтобы получить одинаковые размеры изображения.

**Рис. 5.16.**  
Искажение, возникающее при использовании телеобъектива и



значительного увеличения при печати удаленных объектов (ЭНМ, 1983 г.)

Отметим также, что во всех случаях перспектива одинакова.

Иногда фотография искажает перспективу настолько значительно, что сознание не в состоянии воссоздать объемность. Фотографии, полученные с помощью телеобъектива и значительно увеличенные, являются хорошим примером такой проблемы. На рис. 5.16 дальний торец каждого железнодорожного вагона кажется шире, чем ближний. Известно, что железнодорожные вагоны имеют форму вытянутого параллелепипеда. Если ширина вагона на фотографии сохраняется в воображении, то его длина кажется меньше, чем в действительности. Сознание решает проблему, отодвигая его дальний конец, и, таким образом, длина вагона будет представляться более близкой к действительной. При увеличении дистанции наблюдения фотография на рис. 5.16 будет казаться нормальной.

Иногда при фотографировании людей, сидящих близко перед фотоаппаратом, на полученной фотографии ноги будут казаться больше, чем голова. Обычно подобные фотографии делаются под малым углом с относительно короткого расстояния. Когда смотришь на такую фотографию, то перспективу хочется назвать ошибочной. В действительности же ничего неправильного в перспективе нет, поскольку фотография отражает реальность. Однако мы не привыкли рассматривать людей с такой необычной точки, поэтому и возникает ощущение нереальности. Подобная проблема возникает и при портретной съемке. Весьма привлекательна идея фотографирования с близкого, выигрышного расстояния 35-мм фотоаппаратом и стандартным объективом таким образом, чтобы весь кадр был заполнен головой и плечами. В результате уменьшается степень увеличения, необходимого для получения фотографии определенного размера [например, 8 x 10 дюймов (20 x 25 см)]. Однако на полученной таким способом фотографии лицо будет казаться искаженным: нос будет выглядеть слишком широким по сравнению с расстоянием между ушами (рис. 5.17, а).

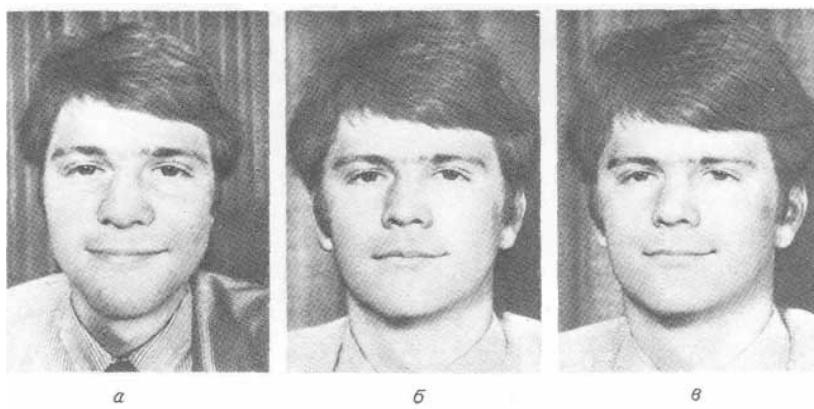


Рис. 5.17.

Портреты, снятые с различных расстояний (ЭНМ, 1983 г.)

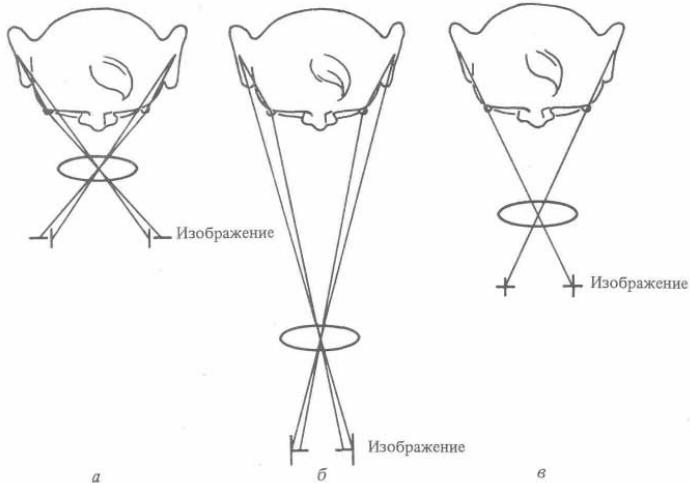
Фотография на рис. 5.11, а была получена с расстояния 30 см, на рис. 5.11, б — 60 см, а на рис. 5.17, в — 1,5 м. На любой из этих фотографий перспектива ни в коей мере не искажена. Трудность восприятия фотографии на рис. 5.11, а заключается в том, что наблюдатель не привык

рассматривать человеческое лицо с такого близкого расстояния. Единственным путем создания фотоснимка с правильной перспективой, такой, какая откроется фотографу при наблюдении снимаемой сцены с наиболее выгодной позиции, является съемка с этой позиции. Например, если на фотографии лицо человека должно выглядеть так, как при наблюдении с расстояния 3 м, то съемка должна проводиться с этого расстояния. Доказательство этого утверждения представлено на рис. 5.18. Представим себе прозрачного инопланетянина, чья голова имеет трапециевидную форму. Допустим, что при рассматривании этого объекта с расстояния наилучшего видения [около 10 футов (3 м)] его глаза закрывают уши. Если объект сфотографировать с меньшего расстояния, то на фотографии уши будут расположены между глазами (рис. 5.18, а), и не существует никаких приемов фотопечати, которые позволили бы совместить уши с глазами. При фотографировании с большего расстояния уши будут располагаться снаружи глаз (рис. 5.18, б). И только при фотографировании с расстояния наилучшего видения глаза и уши будут совпадать (рис. 5.18, в), и можно делать любое увеличение с сохранением впечатления, которое создается головой трапециевидной формы. Однако, если увеличение или расстояние наблюдения выбраны неверно, перспектива не будет сохранена.

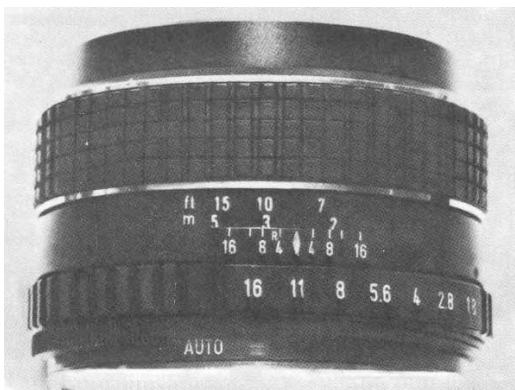
#### Геометрическая трактовка глубины резко изображаемого пространства

Если предметы находятся на различных расстояниях перед объективом, то формируемые им резкие изображения этих предметов будут находиться также на различных рассто- Рис. 5.18.

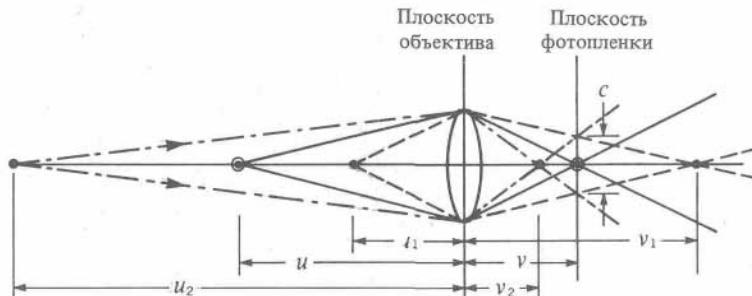
## Особенности съемки портрета с различных расстояний



ограниченной способностью глаза различать, какие изображения являются резкими, а какие нет. Вообразим набор точек, напечатанных на листе бумаги.



разрешение нормального глаза составляет около 0,08 мм. Однако в большинстве случаев в качестве разумной границы разрешающей способности глаза принимается величина 0,25 мм, которая наиболее часто используется в фотографии для определения глубины резко изображаемого пространства. Если вообразить, что фотография представляет собой набор точек и если каждая точка представляется резкой, то весь фотоснимок будет казаться резким. На рис. 5.20 показано формирование изображений точек, находящихся на разных расстояниях от объектива, в плоскости пленки. Изображение точки, лежащей на расстоянии  $u$  от объектива, будет сфокусировано на расстоянии  $v$  за объективом. Точечные объекты, отстоящие от объектива на  $u_1$  и  $u_2$ , фокусируются на расстояниях  $v_1$  и  $v_2$  соответственно. Изображения этих объектов, образующиеся в плоскости пленки, представляют собой кружки, которые называются *кружками рассеяния*. Расстояния  $u_1$  и  $u_2$  подобраны так, что кружки имеют один и тот же диаметр  $c$ . Отметим, что объекты, расположенные к объективу ближе, чем  $m_p$ , или дальше, чем  $u_2$ , будут создавать кружки рассеяния, диаметр которых превышает  $c$ . Изображения всех точек, лежащих между  $u_1$  и  $u_2$ , будут иметь диаметр меньше  $c$ . Если величина  $c$  соответствует предельному разрешению глаза, то изображения всех точек, лежащих между  $u_1$  и  $u_2$ , будут в плоскости пленки одинаково резкими при получении отпечатка контактным способом и при наблюдении изображения невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения. Другими словами, изображения всех этих точек будут «в фокусе». Кружок на негативе, который соответствует кружку предельного разрешения глаза на фотоотпечатке, называется *предельным кружком рассеяния*.



ях позади объектива. Это должно означать, что резкие изображения могут быть образованы только теми объектами, которые находятся на одном и том же расстоянии от фотоаппарата. Однако на фотоснимках изображения предметов, лежащих на разных расстояниях от фотоаппарата, получаются сфокусированными. Многие объективы фотоаппаратов снабжены шкалами, позволяющими определять глубину резко изображаемого пространства в зависимости от расстояния до объекта и установленной диафрагмы (рис. 5.19). Рассмотренная проблема объясняется

Рис. 5.19,

Типичная шкала глубины резко изображаемого пространства (ЭНМ, 1983 г.)

Рассматривая точки с помощью лупы, увидим, что все они имеют разные диаметры. Если точки рассматривать невооруженным глазом с минимального расстояния наилучшего видения (около 25 см), то будет казаться, что все самые малые точки имеют один и тот же размер. Минимальный размер точки, который глаз еще может различить, называется *пределом разрешения* (разрешающей способностью) глаза; он определяется дифракционными эффектами в глазе. Предельное

Рис. 5.20.

Иллюстрация к определению глубины резко изображаемого пространства. Изображения всех других точек на оптической оси будут «не в фокусе». Следовательно, любые

объекты, лежащие между  $u_1$  и  $u_2$ , будут в фокусе, а все остальные — не в фокусе. Расстояние  $m_2$  (максимальное расстояние, когда изображение еще в фокусе) обозначается  $D_2$  и  $u_l$  (минимальное расстояние, когда изображение еще в фокусе) обозначается  $D_r$ . Расстояние  $D_2 - D_r = D$  называется глубиной резко изображаемого пространства.

До сих пор предполагалось, что мы рассматриваем отпечаток, полученный с негатива контактным способом, а не обычную фотографию, полученную при увеличении негатива. Если фотография получена с увеличением, то размер кружка рассеяния будет больше предельного разрешения глаза и глубина резко изображаемого пространства уменьшится. Если кратность увеличения равна  $M$ , то диаметр кружка рассеяния  $c$ , который необходимо получить на негативе, равен предельному разрешению глаза, уменьшенному в  $M$  раз.

Предельное разрешение глаза определяется диаметром предельного кружка, наблюдаемого с расстояния 10 дюймов (25,4 см). Полезно представить предельное разрешение глаза через угол  $\alpha$ , вершина которого совпадает с центром глаза (рис. 5.21). Этот угол называется *угловым разрешением*. Из рисунка видно, что угол  $\alpha$  равен  $0,01/10 = 0,001$  рад  $\approx 0,06^\circ \approx 3,5'$ . Эта величина не зависит от расстояния наблюдения, если вычисляется в предположении, что объект лежит на минимальном расстоянии наилучшего видения. Следовательно, предел разрешения глаза пропорционален расстоянию наблюдения.

**Пример 5.7.** Пусть у нас имеется 35-мм негатив, который имеет размер 24 x 36 мм. С негатива необходимо получить фотоотпечаток с десятикратным увеличением. Этот отпечаток рассматривается с расстояния 25 см. Какой предельный кружок рассеяния должен иметь негатив, чтобы его смысловая часть была в фокусе?

Отметим, что 10-кратное увеличение кружка диаметром 0,025 мм приведет к кружку диаметром 0,25 мм, равному предельному разрешению глаза на минимальном расстоянии наилучшего видения. Следовательно, предельный кружок рассеяния для смысловой части негатива, которая должна быть в фокусе, должен иметь диаметр, меньший или равный 0,025 мм.

Теперь предположим, что стенная роспись рассматривается с минимального расстояния 1,50 м.

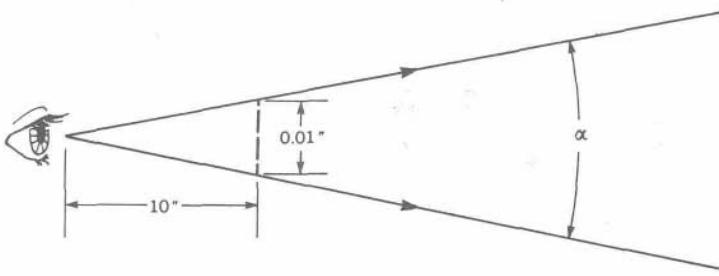


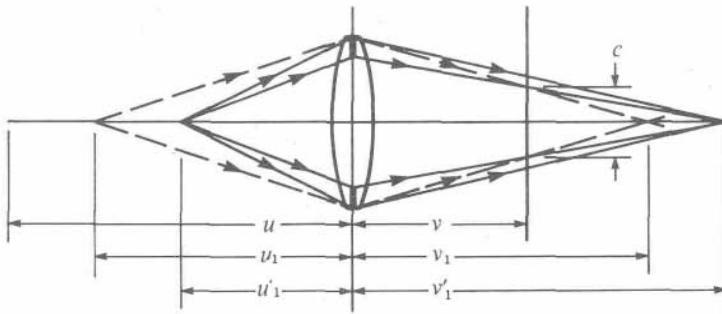
Рис. 5.21.

Угловое разрешение глаза  
Какое допускается увеличение  
негатива, чтобы качество отпечатка не  
ухудшилось по сравнению с самим  
негативом?

Это условие будет выполнено в том  
случае, если та часть картины,  
которая была сфокусирована на

негативе, сохранится и на отпечатке. Так как расстояние наблюдения в шесть раз больше расстояния наилучшего видения, предельное разрешение глаза увеличивается до  $6 \times 0,25\text{мм} = 1,5$  мм. Если 10-кратное увеличение дает предельный кружок диаметром 0,25 мм, то 60-кратное увеличение дает предельный кружок диаметром 1,5 мм.

Глубина резко изображаемого пространства также зависит от величины относительного отверстия объектива. Этот факт иллюстрируется рис. 5.22. Рассмотрим точку на расстоянии  $u_l$  и ее изображение на расстоянии  $v_r$ . Когда объектив полностью открыт, изображение точки в плоскости пленки (расстояние  $v$  от объектива) представляет собой кружок, диаметр которого равен диаметру предельного кружка рассеяния. Если объектив полностью открыт и фокусируется на ту же точку, что и при  $u$ , то  $u_l$  — минимальное расстояние, на котором изображение точки еще будет в фокусе ( $D^*$ ). В этом случае точка при  $u_l'$  не будет в фокусе, поскольку диаметр кружка рассеяния в плоскости пленки будет больше  $c$ . Однако, когда в объективе уменьшено действующее отверстие, как показано на рис. 5.22, пучок лучей из точки при  $u_l'$ , образующих изображение при  $v_r$ , имеет в сечении диаметр, равный диаметру предельного кружка рассеяния в плоскости пленки вследствие ограничения периферийных лучей. Поэтому изображение этой точки в плоскости пленки будет выглядеть резким, т. е. точка будет в фокусе. Минимальное расстояние, при котором изображение еще будет в фокусе ( $D^*$ ), при этом уменьшается и глубина резко изображаемого пространства увеличивается. Читатель убедится, используя аналогичный рисунок, что максимальное расстояние, при котором изображение находится в фокусе ( $D_2$ ), возрастает с уменьшением отверстия объектива на одну ступень, т. е. глубина резко изображаемого пространства увеличивается.



**Рис. 5.22.**

Влияние относительного отверстия объектива на глубину резко изображаемого пространства.

Если камера фокусируется на объекты, которые находятся далеко от нее, то плоскость пленки приближается к объективу. Это является причиной увеличения кружка рассеяния для близких объектов и его уменьшения для

далеких объектов (рис 5.20) Следовательно,  $D_l$  должно увеличиваться, а  $D_2$  может увеличиться для данного предельного кружка рассеяния Так как  $f>_2$  увеличивается более быстро, чем  $Z$ , глубина резко изображаемого пространства возрастает, если фотограф фокусирует объектив на предметы, расположенные далеко от него

Глубина резко изображаемого пространства уменьшается при данном расстоянии до объекта, когда берется объектив с большим фокусным расстоянием Это происходит потому, что  $D_2$  уменьшается, а  $D_l$  увеличивается с ростом фокусного расстояния, если все остальные параметры остаются неизменными.

#### Математическая трактовка глубины резко изображаемого пространства

Используя элементарную геометрию, можно показать, что для тонких линз максимальная глубина, при которой объекты будут в фокусе для предельного кружка рассеяния диаметром  $c$ , равна  $D_2=fd(m+l)/(md-c)$  (5.7)

где  $d$  — диаметр действующего отверстия и  $m$  — увеличение  $\wedge$  Минимальное расстояние, при котором объекты будут в фокусе, определяется выражением

$$D^\wedge = dj(m+1)l/(md+c) \quad (5.8)$$

$$D = D_2 - D_l = 2fdc(m+l)/(nSd^2 - c^2) \quad (5.9)$$

Аналогичные выражения могут быть получены и для случая толстой линзы, но все расстояния измеряются относительно положения входного зрачка и соответствующего входного диаметра апертуры того же входного зрачка

**Пример 5.8.** Рассмотрим величину  $D$ , когда  $m=1$  и  $c=0,001$  дюйма (0,0254 мм), то  $d^2$  будет велико по сравнению с  $c^2$  <sup>TM</sup>

$$D = 4fdc/d^2 = 4cf,$$

так как  $// < \frac{c}{f}$  Значит, если  $// = 16$ , то  $D=0,064$  дюйма (1,626 мм), т. е очень мало Таким образом, глубина резко изображаемого пространства в макрофотографии очень мала.

Если камера сфокусирована на объектах, расположенных еще дальше, то  $m$  уменьшается и оба значения  $D_l$  и  $Z$ , увеличиваются Так как  $D_2$  увеличивается быстрее, чем  $f>p$  глубина

Morgan Introduction to Geometric and Physical Optics, New York McGraw-Hill 1953, p 153

резко изображаемого пространства будет возрастать. При  $md=c$  величина  $D_2$  (и  $D$ ) и глубина резко изображаемого пространства стремятся к бесконечности. Расстояние, при котором камера сфокусирована так, что  $md=c$  и  $D_2 = D = \infty$ , называется *гиперфокальным расстоянием*<sup>1)</sup>. Для обозначения этого расстояния используется символ  $H$ . Это число имеет важное практическое значение. Решая систему уравнений  $md=c$ ,  $m=v/u$ ,  $lu+lv=lfw$ ,  $fl=fld$ , для  $u=H$  найдем

$$H=f/(cf) + f. \quad (5.10)$$

В большинстве случаев  $f < cf$ , и поэтому с достаточной точностью получим

$$H=fl(cf). \quad (5.11)$$

Так как  $//$  и  $c$  — доступные величины, значение  $H$  можно легко определить. Отметим, что, когда выражение (5.11) справедливо,  $H$  пропорционально  $u^2$  и обратно пропорционально  $f$ -числу. Можно выразить величины  $D_l$  и  $D_2$  через  $H$ , ми/. Для этого необходимо сделать замены  $f'=f/d$  и  $m=f/(u-f)$  в выражениях (5.7) и (5.8) и воспользоваться точным выражением (5.10) для  $H$ . В результате получим

$$D_2=u(H-f)/(H-u), \quad D_l=u(H-f)/(H+u-2f). \quad (5.12), (5.13)$$

Систему уравнений (5.12) и (5.13) можно решить относительно  $u$  и  $H$ , выразив их через  $D_p$ ,  $D_2$  и  $f$ :  $u = 2D^p D_2 / (D_p + D_2)$ ,  $H = 2D_p D_2 (u-f) / (D_2 - D_l) + f$ . (5.14), (5.15)

Если же воспользоваться приблизительным выражением (5.11) для  $H$ , то аналогично найдем

$$D_2=Hu/[H-(u-f)], \quad f>_p = Яи/[Я+(m-)], \quad (5.16), (5.17) \quad u = 2D_2 D_l / (D_2 + D_l), \quad H = 2D_2 D_l (u-f) / (D_2 - D_l). \quad (5.18), (5.19)$$

Если уравнение (5.11) выполняется и, кроме того,  $u > f$ , легко получить

$$D_2=Hu/(H-u), \quad D^p Hu KH + u, \quad (5.20), (5.21)$$

$$u=2D_2 D_l / (D_2 + D_l), \quad H=2D_2 D_l / (D_2 - D_l). \quad (5.22), (5.23)$$

Отметим, что полученные выражения не могут быть использованы в макрофотографии. Однако выражения (5.16) — (5.19) применимы в большинстве случаев.

**Пример 5.9.** Рассмотрим случай макрофотографии. С помощью объектива, имеющего фокусное расстояние 2 дюйма (50,8 мм) и относительное отверстие 1:16, фотографируется

" Гиперфокальное расстояние иногда определяют как  $D_h$ , когда  $i=\infty$ . Это определение не вполне строгое, что можно показать, находя предел выражения (5.13) при  $m=\infty$ . Однако принятное определение удовлетворительно, пока справедлива формула (5.11) [ср. с уравнением (5.17) при  $m=\infty$ ].

часть цветка, расположенного на расстоянии 6 дюймов (15,24 см) от фотоаппарата. Диаметр предельного кружка рассеяния равен 0,001 дюйма (0,025 мм). Найти точные и приблизительные значения  $H$ ,  $D_2$ ,  $D_v$ ,  $D$ .

Используя выражение (5.10), получаем точное значение для  $H$ , которое составляет 252 дюйма (640 см). Согласно формуле (5.11), приближенное значение равно 250 дюймам (635 см). Подставляя найденные значения в выражения для  $D_2$  и  $D_v$ , найдем, что точные выражения (5.12) и (5.13) и выражения первого приближения (5.16) и (5.17) дают один и тот же результат:  $D_2=6,10$  дюйма (15,5 см),  $f=5,19$  дюйма (13,2 см) и  $D_2-D_v=f=0,19$  дюйма (0,48 см). Используя формулы второго приближения (5.20) и (5.21), получим  $D_2=6,15$  дюйма (15,62 см),  $O_v = 5,85$  дюйма (14,86 см) и  $D=0,29$  дюйма (0,74 см). Значение  $D$  в этом случае приблизительно на 50% больше точного значения.

**Пример 5.10.** Предположим, что фотографируется сюжет, который должен быть в фокусе в интервале расстояний 3—10 м. Предположим, что предельный кружок рассеяния имеет диаметр 0,025 мм и что фокусное расстояние объектива равно 55 мм. Каково расстояние фокусировки и какое нужно использовать значение диафрагмы, чтобы получить заданную глубину резко изображаемого пространства?

Расстояние до объекта [выражение (5.22)] составляет  $2-10-3/(10+3) = 4,6$  м. Для того чтобы определить значение диафрагмы, сначала надо найти  $H$ . В нашем примере  $u=460$  см и  $f=5,5$  см. Следовательно, и поэтому можно использовать большинство приближенных выражений.

Величина  $H$  [уравнение (5.23)] равна  $2-10-3/(10-3)=8,6$  м. Из выражения (5.11) получим  $H=5,5^2/(0,0025 \cdot 860) = 14$ . Следовательно, в фотоаппарате относительное отверстие должно быть выбрано между 1:11 и 1:16.

Приведенная математическая трактовка дает понимание количественных аспектов глубины резко изображаемого пространства, но не очень практична, кроме некоторых сложных ситуаций. На практике объективы фотокамер представляют собой толстые линзы, что приводит к затруднениям при определении расстояния до объекта, так как измерение расстояния необходимо проводить относительно положения входного зрачка. Эта проблема особенно актуальна в макрофотографии. В случае когда  $u \gg f$ , из выражений для  $D_2$  и  $B_v$  может быть получено простое правило, которое может быть весьма полезным при съемке многопланового сюжета. Отметим, что в нашем приближении при  $u \gg f$  имеем  $D_2=\infty$ , а  $D^H=f/2$ . При фокусировке на  $u=f/2$  получаем  $D_2=f$  и  $D^H=f/3$ . Вообще если фотокамера сфокусирована на

$$u = Hln, \quad (5.24) \quad \text{то} \quad D_2 = H/(n-1), \quad O^H = H(n-1). \quad (5.25), (5.26)$$

Если  $H$  неизвестно, его значение можно найти, воспользовавшись выражением (5.11).

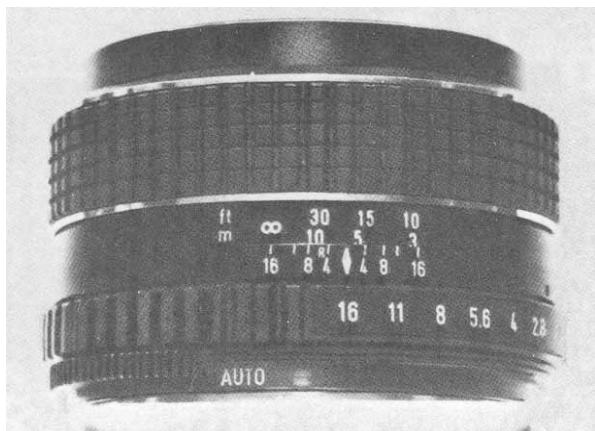
### Шкала глубины резко изображаемого пространства

Для определения глубины резко изображаемого пространства более практично пользоваться шкалами, которыми снабжается большинство объективов. Шкала на рис. 5.19 показывает число между 10 и 7 футами [приблизительно 8 футов (2,44 м)] напротив риски-указателя в виде ромба. Это означает, что фотокамера сфокусирована на 8 футов (2,44 м). Отметим, что расстояние около 15 футов (4,57 м) соответствует первой цифре 16 на шкале глубины резко изображаемого пространства, а расстояние меньше чем 7 футов — второй цифре 16. Отсюда можно заключить, что все предметы, находящиеся на расстояниях от 7 до 15 футов, будут в фокусе при диафрагменном числе 16. При установке диафрагменного числа 8 глубина резко изображаемого пространства составляет 7—10 футов (2,13—3,05 м).

К сожалению, информация, получаемая с помощью рассмотренной шкалы, не столь точна, как может потребоваться. При каждом отсчете необходимо проводить значительную интерполяцию по нелинейной шкале, и, кроме того, большинство шкал в действительности указывает расстояние до плоскости пленки  $u+v$ , а не до главной плоскости  $u$ . Но, несмотря на все это, шкала глубины резко изображаемого пространства весьма полезна.

Гиперфокальное расстояние — это расстояние от объектива до самого близкого предмета, изображаемого резко при установке объектива на бесконечность. Поэтому, для того чтобы определить гиперфокальное расстояние, необходимо установить символ  $\infty$  напротив

определенного значения диафрагмы и затем считать значение  $H$  напротив риски-указателя (рис. 5.23). В рассмотренном примере это расстояние составляет 20 футов (точнее 21 фут) для диафрагмы 16. Чтобы увеличить до предела глубину резко изображаемого пространства, необходимо установить объектив на гиперфокальное расстояние; тогда  $f > 2^{\circ} D^H/2$ . Если же объектив установлен так, что  $m = 0$ , то  $D_2 = \infty$  и  $D_f = H$ ; при этом общая глубина резкости уменьшается, несмотря на то, что в обоих случаях задняя граница остается в бесконечности. Используя найденное значение  $D_f$ , величину  $c$  можно найти из уравнения (5.11) — в этом заключается принцип построения шкалы глубины резко изображаемого пространства. Зная  $H$  при данных  $f$ ,  $/c$ , из выражения (5.11) можно определять  $H$  для любых объектов с различными фокусными расстояниями и (или) значениями диафрагмы в предположении, что  $c$  не меняется.



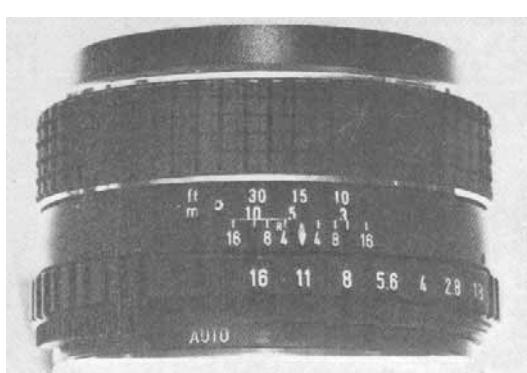
наложены те же самые ограничения по  $c$ .

Из (5.11) следует, что  $H$  приблизительно пропорционально  $1//c$ . Следовательно, если диафрагменное число уменьшено наполовину, то  $H$  удваивается и становится равным  $(16/8) \cdot 21 = 42$  фута (12,8 м). Кроме того,  $\Delta$  приблизительно пропорционально  $1/c^2$ . В случае 110-мм объектива  $\Delta$  равно  $(110/55)^2 \cdot 42 = 4 \cdot 42 = 168$  футов (51,2 м).

**Пример 5.12.** Предположим, что мы используем объектив с фокусным расстоянием 55 мм при диафрагме 8 (как и в предыдущем примере). Определить значения  $D_2$  и  $D_f$ , если расстояние до объекта равно 7 футам (2,13 м).

Используя уравнение (5.24), найдем, что  $c = 42/7 = 6$ . Из уравнений (5.25) и (5.26) вычисляем  $D_2 = 8,4$  фута (2,75 м) и  $D_f = 6$  футов (1,83 м). Выражения для  $D_2$  и  $D_f$  справедливы, поскольку  $m = 7$  футов = 84 дюйма значительно превосходит фокусное расстояние объектива ( $= 55$  мм ~ 2 дюйма).

В заключение рассмотрим ситуацию, когда заранее известна необходимая глубина резко изображаемого пространства. Возникает вопрос, как в этой ситуации определить диафрагменное число и расстояние до объекта, чтобы достичь определенной глубины резко изображаемого пространства. Как было показано, для этого надо применить полученные ранее выражения. Однако можно воспользоваться и шкалой глубины резко изображаемого пространства, а также самим фотоаппаратом. Вначале фотоаппарат применяется в качестве дальномера для определения передней и задней границ резко изображаемого пространства, внутри которого нужная часть сцены будет в фокусе. В случае однообъективной зеркальной фотокамеры это делается наиболее легко при полностью открытом объективе. Объектив устанавливается таким образом, чтобы величины  $D_2$  и  $D_f$  располагались симметрично относительно риски-указателя шкалы.



шкала, показано на рис. 5.24. При такой настройке фотоаппарат был бы сфокусирован на

**Пример 5.11.** Пусть у нас есть 35-мм однообъективный зеркальный фотоаппарат с объективом, фокусное расстояние которого равно 55 мм, и известно, что шкала глубины резко изображаемого пространства была рассчитана для  $c = 0,001$  дюйма (0,0254 мм).

Рис. 5.23.

Определение гиперфокального расстояния с помощью шкалы глубины резко изображаемого пространства (ЭНМ, 1983 г.)

Предполагая  $H$  равным 21 футу (6,4 м) для диафрагменного числа 16, определить  $\Delta$  для диафрагменного числа 8. Найти  $H$  для 110-мм объектива при диафрагме 8, если на этот объектив

Рис. 5.24.

Определение глубины резко изображаемого пространства в примере 5.13 (ЭНМ, 1983 г.)

Тогда диафрагменное число, лежащее напротив  $D_2$  ( $f >$ ), и есть искомое значение.

**Пример 5.13.** Предположим, что при фотографировании части старого разрушенного корабля желательно, чтобы предметы, находящиеся на расстоянии от 10 футов (3,05 м) до 30 футов (9,14 м), были в фокусе. Используется объектив с фокусным расстоянием 55 мм. Положение, в которое установлена

расстояние около 15 футов (4,57 м). Если установить диафрагму в положение И, то глубина резко изображаемого пространства будет соответствовать заданным условиям.

### Глубина резкости

Понятие *глубины резкости* можно проиллюстрировать с помощью рис. 5.25, где точечный объект, лежащий на расстоянии  $u$ , сфокусирован при  $v$ .

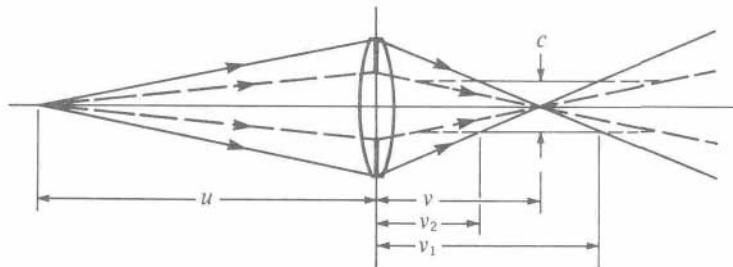


Рис. 5.25.

Иллюстрация к определению глубины резкости

Помня, что все кружки рассеяния, меньшие предельного (диаметром  $c$ ), воспринимаются как точки, легко увидеть, что при полностью открытом объективе изображение точки будет в фокусе, если плоскость пленки расположена на расстоянии между  $v_1$  и

$v_2$ . Величина, равная  $v_2 - v_1$ , называется глубиной резкости. Отметим, что если объектив задиафрагмирован (ход лучей показан штриховыми линиями), то глубина резкости возрастает. Вот почему при наводке на резкость зеркального фотоаппарата или складной камеры по матовому стеклу необходимо полностью открывать объектив. Хотя глубина резко изображаемого пространства уменьшается с открытием объектива, наводка на резкость при этом улучшается, если на фотографии требуется выделить один, главный объект съемки. Увеличение яркости поля изображения приводит к уменьшению отверстия зрачка глаза, что также улучшает фокусирующую способность.

Глубину резкости можно сравнительно легко определить, исходя из рис. 5.26. Отметим, что глубина резкости Асимметрична относительно изображения точки  $O$ . Из подобия треугольников АOB и JOK получим  $(d/2)/v = (c/2)/(F/2)$ , откуда

$$P=2cy/(I=2c/\text{эфф} = 2c(m+1)) //, \quad (5.27)$$

так как  $u/Y//\text{эфф}=(t+1)//$  [см. выражение (5.6)]. При  $//=16$  для  $c=0,001$  дюйма (0,25 мм) величина  $F$  изменяется от 0,032 дюйма (0,81 мм) для объекта, расположенного на бесконечности ( $t=0$ ), до 0,064 дюйма (1,62 мм) для объекта, находящегося на двойном фокусном расстоянии ( $t=1$ ). Глубина резкости весьма мала даже при задиафрагмированном объективе. Последнее накладывает довольно строгие ограничения на точность изготовления фотоаппарата и на допустимое искривление фотопленки. По этой причине применяются специальные направляющие полозки и прижимные пластины, чтобы предохранить плоскость пленки от искривления.

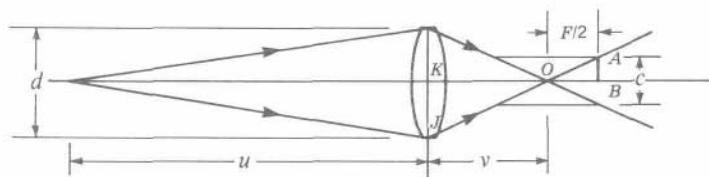
### Остановка движения

Используя предельный кружок рассеяния (диаметром  $c$ ), можно получить критерий, позволяющий определять максимальное время экспонирования для фотографирования движущегося объекта, при

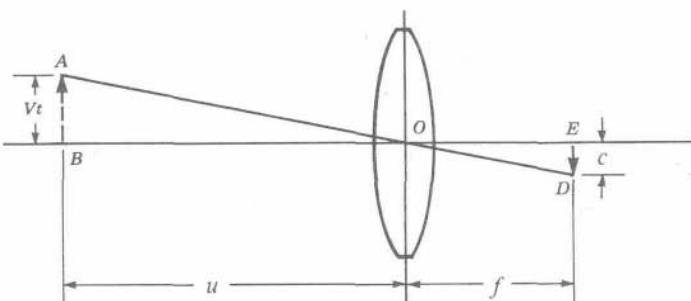
котором его изображение на пленке еще остается резким. Очевидно, что если изображение точки на пленке смещается менее чем на расстояние  $c$  за время срабатывания затвора, то изображение будет резким.

Рис. 5.26.

Определение глубины резкости.



Рассмотрим объект, движущийся со скоростью  $v$  перпендикулярно линии зрения (рис. 5.27).



Предположим, что этот объект расположен достаточно далеко от линзы, так что его изображение находится в фокальной плоскости, и пусть время срабатывания затвора равно  $t$ .

Рис. 5.27.

Формирование изображения предмета, движущегося перпендикулярно оптической оси

Точечный объект за это время перемещается на расстояние  $vt$ . Из подобия треугольников АOB и EOD следует  $vt/u = vt/f$ .

Поэтому максимальное время экспонирования для формирования резкого изображения составит  $t=uc/(vf)$ . (5.28)

**Пример 5.14.** Пусть фотографируется в движении спортсмен, пробегающий 100 м за 10 с.

Предположим, что предельный кружок рассеяния равен 0,25 мм и что используется фотоаппарат с объективом, имеющим фокусное расстояние 50 мм, и минимальным временем экспонирования 1/1000 с. Определить минимальную дистанцию, с которой фотограф может снимать, чтобы получить резкое изображение фигуры бегущего спортсмена. Считать, что оптическая ось объектива расположена перпендикулярно направлению движения спортсмена.

Скорость бегуна  $v=100-100/10=1000$  см/с.

Из выражения (5.28) найдем  $i = 1000 \cdot 5,0 - (1/1000)/0,0025$  см = 2000 см = 20 м. Может возникнуть желание воспользоваться объективом с большим фокусным расстоянием, чтобы получить увеличенное изображение. Однако это неосуществимо, поскольку, как следует из (5.28), увеличение /вынуждает пропорционально увеличивать  $i$ . Увеличение фотоснимка в процессе фотопечати также не поможет, поскольку в этом случае налагается более строгое ограничение на величину  $c$ , что потребует увеличения  $i$ .

Для движения объекта под углом, меньшим чем  $90^\circ$ , относительно линии наблюдения можно показать, что в выражении (5.28) вместо  $v$  необходимо использовать перпендикулярную к линии наблюдения составляющую скорости. Таким образом,

$$t = uc/(fv \sin \beta). \quad (5.29)$$

Это выражение получено в предположении, что, несмотря на изменение расстояния до объекта за время срабатывания затвора, размеры изображения практически сохраняются неизменными.

Возникает вопрос, на сколько фотограф может приблизиться при съемке к объекту, который удаляется от камеры или приближается к ней, так, чтобы при этом избежать нерезкости изображения, вызываемого изменением его размеров. Аналогично предыдущим рассуждениям с учетом ограничений, связанных с предельным кружком рассеяния и наложенных на изменение размера изображения, можно показать, что если объект высотой  $h$  над оптической осью перемещается в направлении камеры со скоростью  $v$ , то максимальное время, на которое может быть открыт затвор, составит  $t = u^2 c / (vhf)$ . Отсюда определяется искомое расстояние съемки  $i$ .

**Пример 5.15.** Если в примере 5.14 спортсмен бежит по направлению к камере, установленной на земле, а его рост составляет 2 м, то минимальная дистанция, на которой он может быть сфотографирован для получения резкого изображения, равна приблизительно 6 м.

Вообще говоря, при попытке «остановить» движение объекта, перемещающегося вдоль линии наблюдения, возникает ряд проблем, существенно зависящих от размеров фотографируемого объекта. Медведь, бегущий на фотографа, — это одно дело, а слон — совершенно другое!

#### КПД и эффективное время действия затвора

Затворы не могут открываться мгновенно. На эффективное время действия затвора влияет точность его изготовления, а в некоторых случаях — величина установленной диафрагмы. Центральный затвор сконструирован так, что при его открытии лепестки расходятся от центра к краям (рис. 2.3). Пучок света, проходящий через затвор из некоторой точки пространства, представляет собой конус с определенным углом раствора (рис. 5.28). Необходимо конечное время, чтобы затвор полностью открыл путь свету, и поэтому освещенность сначала постепенно увеличивается, а затем уменьшается в

процессе срабатывания затвора. Этот процесс на его различных стадиях проиллюстрирован положением лепестков на рис. 5.29, я и зависимостью освещенности  $E$  от времени  $t$  на рис. 5.29, б. Картина значительно упрощена, поскольку скорость движения лепестков

Рис. 5.28.

Положения центрального и шторного затворов в фотоаппаратах

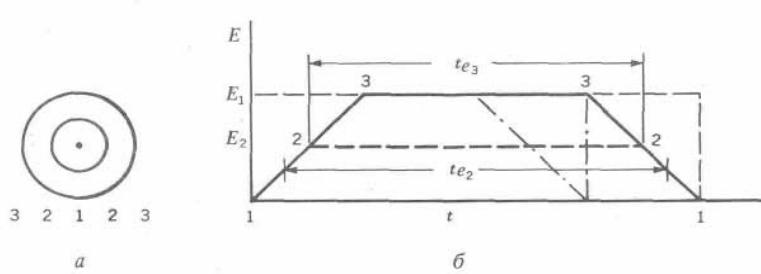
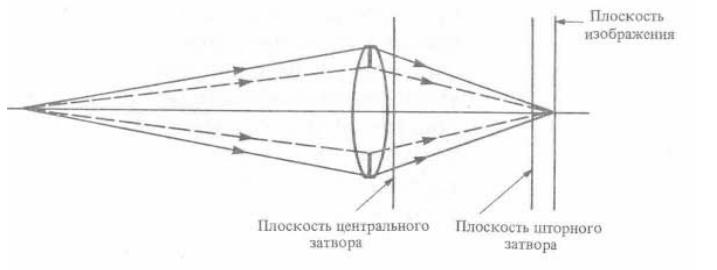


Рис. 5.29.

Иллюстрация действия центрального затвора.

непостоянна. Числа на рис. 5.29, б соответствуют определенным позициям лепестков затвора на рис. 5.29, а. Умноженное на 100 отношение площади трапеции к площади

прямоугольника, построенного на ее большем основании (штриховая линия), называется

коэффициентом полезного действия затвора.

При уменьшении выдержки (штрихпунктирная линия на рис. 5.29) общее время открытия затвора будет короче, и, так как на открытие и закрытие затвора затрачивается одинаковое время, эффективность затвора уменьшается. Для выдержки 1 с затвор имеет КПД около 100%. При выдержке 1/50 с КПД обычно падает до 85—90%, а при 1/250 с КПД может быть ниже 65%. Эффективное время действия затвора  $t_e$  — это время, в течение которого идеальный затвор остается открытым (при мгновенном открытии и закрытии), причем он должен обеспечивать ту же самую экспозицию, что и реальный затвор. На рис. 5.29 эффективное время — это время, в течение которого затвор остается открытым не меньше чем на половину  $t_e$ . Если объектив задиафрагмирован, как показано

на рис. 5.28 (штриховая линия), то диаметр пучка света уменьшается (рис. 5.29, а, позиция 2), и максимальное открытие затвора соответствует значению освещенности вдоль линии 22 на рис. 5.29, б. Эффективное время действия затвора при этом увеличивается до  $t_e$ . Отсюда следует, что если объектив камеры с центральным затвором задиафрагмирован, то эффективное время экспонирования увеличивается.

Уменьшение КПД затвора с уменьшением времени экспонирования может быть скомпенсировано путем изменения конструкции затвора таким образом, чтобы он обеспечивал правильное эффективное время для каждой экспозиции. Однако изменение эффективного времени экспонирования путем изменения диафрагмы необходимо корректировать при использовании фотоаппарата в ручном режиме. Если выдержка составляет 1/500 с при относительном отверстии 1:1,8, то при уменьшении диафрагмы до 16 будет наблюдаться переэкспонирование на целую ступень. Передержка уменьшится на пол ступени при той же самой диафрагме 16, если выдержка увеличивается до 1/250 с. Фотоаппарат с встроенным экспонометром, работающий в автоматическом режиме, может исправлять эту передержку в зависимости от временных характеристик электронной цепи затвора и фотоэлементов.

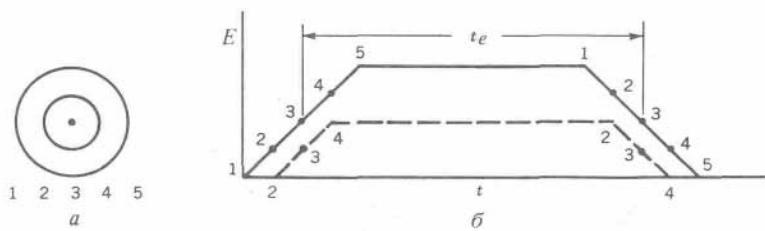


Рис. 5.30.

Иллюстрация действия шторного затвора

Однако для обеспечения высокого качества фотоснимков необходимо делать несколько проб. На рис. 5.29, б представлен случай увеличения КПД затвора с уменьшением диафрагмы, однако

этот вопрос лучше обсуждать с использованием эффективного времени экспозиции, как будет показано при рассмотрении шторного затвора, расположенного в фокальной плоскости.

Так как пленка должна помещаться в плоскости изображения, невозможно расположить шторный затвор точно в фокальной плоскости. Поскольку шторный затвор должен располагаться перед плоскостью изображения, он также будет «зарезать» пучок света (рис. 5.28). Простейший шторный затвор состоит из двух прорезиненных тканевых шторок,двигающихся горизонтально (рис. 2.9).

Начало экспонирования пленки соответствует открытию пучка света в последовательности /—5 (рис. 5.30, а). Процесс закрытия протекает в такой же последовательности, поскольку закрывающая шторка движется в том же самом направлении. На рис. 5.30, б показан график зависимости освещенности от времени. Из графика находится КПД идеализированного затвора, определенный выше.

КПД шторного затвора падает с уменьшением времени выдержки по причинам, аналогичным случаю центрального затвора. Если объектив задиафрагмирован на одну ступень, КПД затвора возрастает при неизменном эффективном времени экспозиции. Причину этого можно понять с помощью рис. 5.30.

Когда объектив задиафрагмирован (рис. 5.28), сечение светового пучка уменьшается до внутреннего круга на рис. 5.30, а. При этом последовательность прохождения шторок показана штриховой линией на рис. 5.30, б. Затвор открывается только по достижении положения 2, наполовину открыт в положении 3 и полностью открыт в 4. Последовательность закрытия такая же. Следовательно, затвор начинает открываться позже, а полностью открывается раньше. Аналогично он начинает закрываться позже и полностью закрывается раньше, чем в случае недиафрагмированного объектива. Важно то, что в положении 3 затвор всегда наполовину открыт или наполовину закрыт. Следовательно, эффективное время экспонирования не меняется с изменением диафрагмы, и поэтому нет необходимости проводить корректировку экспозиции, если объектив задиафрагмирован.

### Упражнения

- На каком расстоянии от картины размером 10 x 15 футов (3,05x4,57 м) при съемке в музее должен находиться фотограф, чтобы, используя 35-мм фотокамеру с объективом, фокусное

- расстояние которого равно 100 мм, получить сплошное заполнение кадра?
2. Как будет изменяться увеличение удаленного предмета, если объектив, обладающий двойным фокусным расстоянием по сравнению со стандартным объективом, заменить на стандартный объектив?
  3. Определить высоту изображения на пленке человека ростом 6 футов (1,83 м), находящегося на расстоянии 12 футов (3,66 м) от фотографа, если фокусное расстояние объектива равно 2 дюймам (5,08 см).
  4. Обычный широкоугольный объектив 35-мм фотоаппарата имеет фокусное расстояние около 28 мм. Каков приблизительно угол поля изображения у такого объектива?
  5. Улитка на макрофотографии изображается в натуральную величину ( $t=1$ ). Она фотографируется в солнечный день на пленку, чувствительность которой равна 125 единиц ASA. Как должно быть скорректировано время экспонирования при относительном отверстии диафрагмы 1:22?
  6. Вы собираетесь сфотографировать фасад большого здания. Вертикальные (и горизонтальные) линии фасада здания должны оставаться на фотографии параллельными. Какие требования при этом должны быть выполнены?
  7. Вы фотографируете объект, используя 35-мм фотоаппарат. Десятикратное увеличение полученного негатива сохраняет правильное пространственное восприятие при рассматривании отпечатка с расстояния 45 см. Тот же самый объект фотографируется с того же самого места с помощью объектива, имеющего фокусное расстояние 165 мм. Какое увеличение не будет приводить к искажению пространственного восприятия, если снимок рассматривается с того же самого расстояния? Какое увеличение требуется для получения настенной фотографии (рассматриваемой с расстояния 180 см) с использованием негатива, полученного в последнем случае?
  8. Необходимо изготовить фотографию человека, чтобы он выглядел на ней так, как представляется с расстояния 6 футов (1,83 м). На каком расстоянии необходимо расположить фотоаппарат?
  9. Максимальный кружок рассеяния для малоформатной фотографии составляет 0,25 мм. Определить диаметр кружка рассеяния для фотографий, предназначенных для декоративного оформления стен помещения и рассматриваемых с расстояния 6 м.
  10. Почему глубина резко изображаемого объективом пространства увеличивается при уменьшении отверстия диафрагмы?
  11. На сколько изменится гиперфокальное расстояние, если диафрагма объектива открывается на одну ступень?
  12. На сколько изменится гиперфокальное расстояние при замене объектива с фокусным расстоянием 55 мм на объектив НО мм, если кружок рассеяния и диафрагменное число не изменились?
  13. Как нужно сфокусировать фотоаппарат, если минимальная и максимальная глубины резко изображаемого пространства составляют 5 и 10 футов (1,52 и 3,05 м)?
  14. Пусть глубина резко изображаемого пространства, согласно шкале 135-мм объектива, соответствует интервалу 12—15 футов (3,66—4,57 м) при относительном отверстии 1:16. Определить гиперфокальное расстояние этого объектива и значение диафрагменного числа.
  15. Гиперфокальное расстояние для 55-мм объектива 35-мм фотоаппарата приблизительно равно 21 футу (6,4 м) при относительном отверстии 1:16. Определить минимальное и максимальное расстояния резко изображаемого пространства, если фотоаппарат сфокусирован на расстояние 7 футов (2,13 м).
  16. Фотографируя автомобиль, движущийся перпендикулярно направлению съемки, фотограф хочет переснять кадр с половины расстояния. Как надо изменить выдержку, если при исходной выдержке было зафиксировано «остановленное» движение автомобиля?

## Часть 3. Светочувствительные

### регистрирующие системы

## Глава 6. Зрение и другие светорегистрирующие процессы

Отвлечемся от вопросов устройства фотоаппарата и рассмотрим средство регистрации изображения (фотопленку). В этой главе также рассматривается глаз как оптическая система и как средство

регистрации и обсуждаются некоторые типы *фотодетекторов* (включая фотопленку). В гл. 7 более подробно описывается фотографический процесс.

Здесь в основном мы будем представлять свет в виде фотонов. Как указано в гл. 4, фотон обладает энергией, пропорциональной частоте света. Чтобы зарегистрировать изображение, энергия фотона должна быть затрачена на создание каким-либо способом изменений в фотодетекторе. Для регистрации оптических изображений используются *фотохимические* или *фотоэлектрические* системы. В фотохимическом процессе энергия поглощенного фотона приводит к такому изменению химической структуры вещества, что информация об изображении (по крайней мере временно) хранится в измененном расположении атомов материала. В фотоэлектрическом процессе фотон взаимодействует со средой так, что освобождается электрон, и информация об изображении хранится в освобожденных электронах. В большинстве фотохимических и фотоэлектрических процессов фотоны сначала взаимодействуют с электронами, вызывая их перераспределение; главное различие этих процессов — в способе хранения информации.

Фотографический процесс может быть разделен на три стадии: экспозиция, проявление и фиксирование. Такое разделение удобно также при обсуждении других процессов. Экспозиция — это взаимодействие фотона с веществом, сопровождающееся формированием изображения. Проявление — процесс, в котором изображение становится видимым. Фиксирование — процесс, в котором изображение становится устойчивым. В процессе проявления происходит значительное усиление зарегистрированной информации.

### Глаз

Оптическая система глаза (рис. 6.1) состоит из *роговицы*, *хрусталика*, *радужной оболочки* и прозрачной вязкой жидкости, называемой *стекловидным телом* (показатель преломления 1,336). Формирование изображения в основном осуществляется роговицей вместе с хрусталиком, которые в комбинации имеют фокусное расстояние около 20 мм. Роговица глаза ограничивает с одной стороны с воздухом и с другой — со стекловидным телом в отличие от объективов, у которых линзы находятся в воздухе.

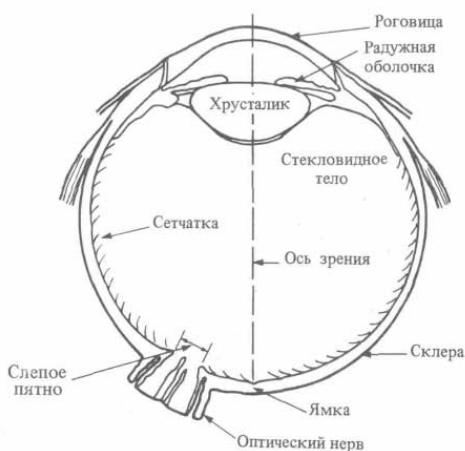


Рис. 6.1  
Строение глаза человека

Сетчатка глаза изогнута и ограничивается со стекловидным телом. В результате получается одноповерхностная линза, которая может значительно изгибаться и при этом функционировать достаточно хорошо.

Кривизна поверхности хрусталика регулируется напряжением или расслаблением мускульных волокон, к которым он прикреплен. Фокусное расстояние глаза взрослого человека может изменяться приблизительно от 18,7 до 20,7 мм, что обеспечивает фокусировку глаза как на дальних, так и на близких объектах. В фотоаппарате наводка на резкость предметов, находящихся на разных расстояниях от камеры, осуществляется перемещением объектива

относительно пленки. С возрастом хрусталик теряет эластичность, и глазные мышцы не способны тогда значительно изменять его фокусное расстояние. Система приобретает фокусное расстояние, соответствующее «состоянию покоя», при котором нормальный глаз сфокусирован на бесконечность. Глаз становится *дальнозорким*, что приводит к необходимости пользоваться очками для близкого зрения. При старении может происходить помутнение хрусталика, ухудшающее зрение. Помутнение называется *катарактой*, и ее лечение часто требует хирургического вмешательства для замены хрусталика другой линзой, способной формировать на сетчатке сфокусированное изображение.

Диаметр апертуры радужной оболочки глаза (зрачок) может изменяться с помощью периферических мышц приблизительно от 2 до 8 мм. Такое изменение обычно происходит самопроизвольно, приводя к обратной пропорциональной зависимости зрачка от яркости окружающего света. Таким образом, «относительное отверстие» глаза может принимать значения приблизительно от 1:10,4 до 1:2,3.

Меньшее значение апертуры

соответствует большей глубине резкости, давая возможность фокусировать глаз на близлежащие объекты при ярком свете

В линзовой системе аберрации исправлены не полностью. Поскольку глаз подвержен сферической аберрации, ее исправление улучшается, если хрусталик затенен радужной оболочкой. Кроме того, глаз обладает значительной продольной хроматической аберрацией. Многие люди не в состоянии сфокусировать глаз на синий объект, если он расположен вблизи глаза. При старении человека с нормальными глазами асимметричные глазные мышцы, окружающие глаз (в основном веки и

мускулатура), вызывают образование у сферической роговицы цилиндрической составляющей с осью, расположенной в горизонтальной плоскости. Это явление называется *астигматизмом* глаза и не имеет ничего общего с аберрацией, рассмотренной в гл. 4 при обсуждении различных видов аберраций сферических линз и имеющей то же название. Астигматизм глаза также может быть следствием врожденного дефекта, при котором ось цилиндрической составляющей хрусталика расположена в любом направлении в плоскости, перпендикулярной оптической оси глаза. В большинстве случаев применение очков позволяет исправить различные виды недостатков глаза как оптической системы. Угол зрения глаза был бы равен  $180^\circ$ , если бы не был ограничен частями лица. И все же два глаза вместе обеспечивают горизонтальное поле зрения  $180^\circ$ .

Фотодетектирующая поверхность — *сетчатка* — образует более половины задней поверхности глаза. Свет попадает на сетчатку, проходя сквозь *слой нейронов* (рис. 6.2), и активирует клетки *фоторецепторного слоя*. Некоторые фотоны, которые не поглотились фоторецепторным слоем, поглощаются эпителием, что уменьшает рассеиваемый обратно свет, который может вызывать ухудшение качества изображения. Склера — плотное внешнее покрытие глаза — имеет опорное и защитное значения. Фоторецепторы делятся на две группы: 1) около  $120 \cdot 10^6$  *палочек*, ответственных за *сумеречное зрение*; 2) около  $6 \cdot 10^6$  *колбочек*, ответственных за дневное зрение. Хотя палочки чувствительны к низким уровням освещенности, они не различают цвета и не способны разрешать малые объекты.

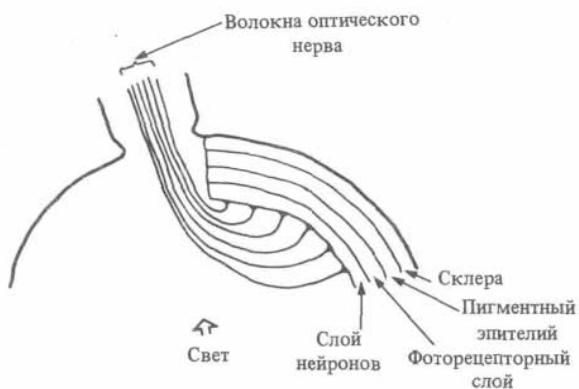


Рис. 6.2.

Поперечный разрез сетчатки

Колбочки, хотя не могут реагировать на низкие уровни освещенности, способны различать цвета и обеспечивают *остроту зрения* (способность различать мелкие детали). Палочки и колбочки неравномерно распределены по сетчатке.

Периферийная часть сетчатки состоит в основном из палочек, а центральная область, называемая *ямкой* (рис. 6.1), состоит в основном из колбочек. Центральная часть ямки (диаметр области 2,5 мм или меньше) содержит около 34 000 колбочек и не содержит палочек. Кроме того, слой нейронов

существенно тоньше в области ямки, т. е. в той области, где глаз имеет наибольшую остроту зрения и способность различать цвета. Ямка кажется покрытой желтым фильтром, называемым *пятном*, функции которого поняты не полностью, но которое может поглощать часть синего света и уменьшать его рассеяние, что улучшает видение в синей части спектра. Поскольку периферия сетчатки состоит в основном из палочек, которые в миллион раз чувствительнее колбочек к слабому свету, при слабом освещении мы лучше видим краями глаз.

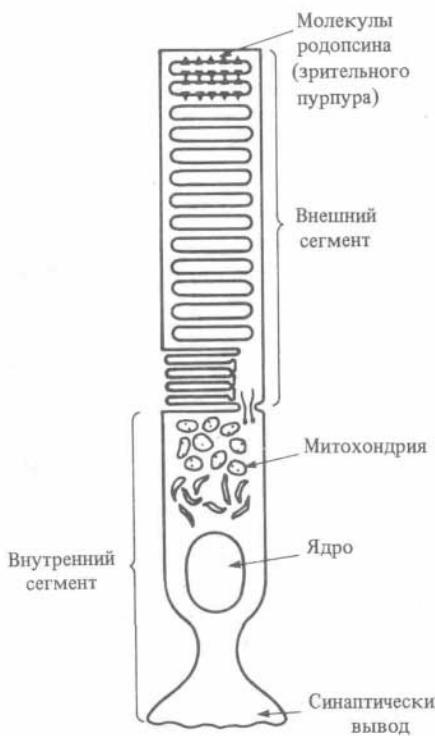
Слой нейронов содержит клетки, которые присоединяют фоторецепторы к волокнам оптического нерва. В оптическом нерве содержится только около 800 000 волокон, поэтому в большинстве случаев несколько фоторецепторов должны присоединяться к нервному волокну. Однако к некоторым нервным волокнам в ямке присоединено только по одной колбочке, что, без сомнения, является фактором, способствующим улучшению остроты зрения этой части глаза.

Информация передается к мозгу в форме электрических импульсов. Точно не известно, как в глазу фотоны генерируют эти электрические импульсы. Известно только, что процесс фотохимический и что за сумеречное зрение ответственны содержащиеся в палочках фоточувствительные химические вещества (пигменты), называемые *родопсинами*. Одним из компонентов всех родопсинов является окисленный витамин A, который представляет собой часть молекулы, поглощающей фотон. Считается, что воздействие фотона приводит к изменению структуры родопсина и вызывает электрический импульс, который передается к оптическому нерву. Структура фоторецепторов отличается тем, что родопсин образуется в самой нижней части фотодетектора, наиболее удаленной от места входа падающего света.

На рис. 6.3 представлена схема палочки, на которой треугольники представляют молекулы родопсина. Свет проходит сквозь слой нейронов, входит в палочку сквозь *синаптический вывод* и, наконец, детектируется в родопсиновых ячейках, несколько тысяч которых скреплены своими тыльными сторонами в плоские диски. Ядро — репродуцирующий элемент ячейки — и *митохондрия* являются источниками энергии для ячейки. Они создают молекулу *аденозинтрифосфата*, которая является энергозапасающей молекулой для ячейки и тела вообще.

Рис. 6.3.

Схема палочки



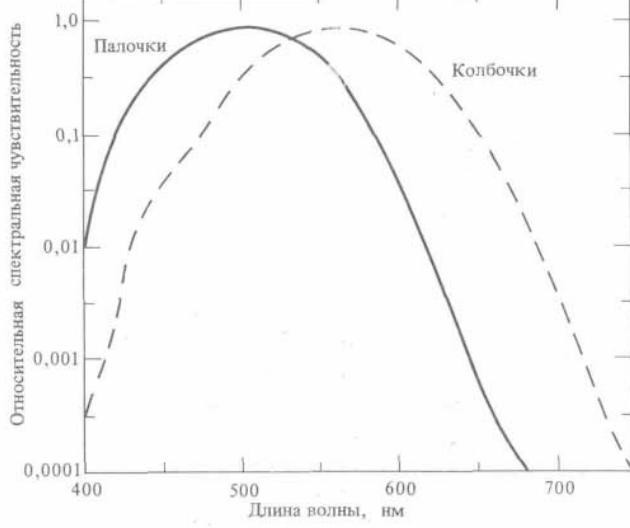
Процесс, в котором фотон изменяет родопсин, аналогичен экспозиции фотографической пленки. Процесс, в котором измененный родопсин генерирует серию электрических сигналов и в котором эти сигналы передаются к мозгу, соответствует проявлению. В этом процессе происходит значительное усиление. Процесс фиксирования может быть уподоблен памяти.

Предположительно колбочки функционируют подобным образом, используя различные пигменты, хотя механизм в этом случае менее понятен. Как отмечалось выше, колбочки дают возможность нормальному глазу разрешать мелкие детали и различать цвета. Они имеют достаточно малые размеры, так что разрешение глаза ограничено aberrациями и дифракцией. Спектральная чувствительность палочек и колбочек представлена на рис. 6.4. Отметим, что масштаб по вертикальной оси логарифмический и две кривые приведены к одному и тому же максимальному значению Пик чувствительности для колбочек находится при 550 нм (что соответствует желто-зеленому цвету) и для палочек — при 510 нм (сине-зеленый цвет). Так как палочки гораздо чувствительнее колбочек (по меньшей мере в  $10^3$  раз) и относительно более чувствительны при коротких длинах волн, уменьшение общей освещенности (например, когда в яркий летний день появляются грозовые облака) создает эффект, называемый *явлением Пуркинье*.

Зеленое и синее кажется неестественно ярким по сравнению с красным при резком уменьшении освещенности. Этот эффект объясняет народную примету, что перед сильной бурей небо зеленеет, так как

**Рис. 6.4.**

Спектральная чувствительность палочек и колбочек глаза человека

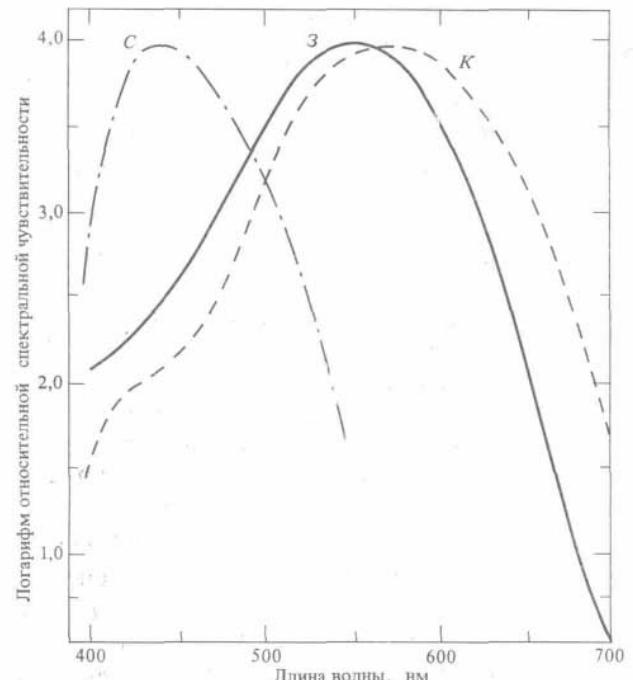


**Рис. 6.5.**

Спектральная чувствительность пигментов трех видов колбочек колбочки, имеющие максимум в средней области длин волн, — зелеными (3) и колбочки с максимумом при больших длинах волн — красными (K). Синие колбочки имеют чувствительность, приблизительно составляющую ОД чувствительности красных и зеленых колбочек. По-видимому, восприятие цвета определяется относительным возбуждением трех типов колбочек. Естественно возникает вопрос о существующих в природе различных типах зрения. Насколько совершенен глаз? Способностью к

при этом происходит быстрое покрытие неба мощным слоем облаков.

В нормальном глазу (в отличие от глаза, не различающего цвета) колбочки могут быть классифицированы по роду пигментов на три группы. Эти пигменты имеют различные кривые спектральной чувствительности (рис. 6.5). Хотя эти кривые в значительной степени перекрываются, пигмент и те колбочки, у которых наибольшая относительная чувствительность соответствует коротким длинам волн, называются синими (C),



цветному зрению обладают некоторые млекопитающие, дневные птицы, рептилии, рыбы, моллюски и ракообразные. По абсолютной чувствительности человеческий глаз превосходят только глаза некоторых насекомоядных, а по разрешающей способности — только глаза некоторых хищных птиц. Человеческий глаз, полностью адаптированный в темноте, может реагировать на минимальный световой поток порядка  $10^{-16}$  Вт/см<sup>2</sup>, что эквивалентно приблизительно тысяче относительно коротковолновых сине-зеленых квантов, проходящих через 1 см<sup>2</sup> за 1 с. Если такое количество энергии будет поглощаться 1 г воды в течение 150 млн. лет, то температура воды повысится только на 1К при условии, что вода поглощает всю световую энергию. Если чувствительность глаза характеризовать величинами, используемыми для описания чувствительности фотопленки (например, единицами чувствительности ASA), то глаз, адаптированный к темноте, при времени экспонирования 1/60с будет обладать чувствительностью, эквивалентной 15 млн. единиц ASA. Если же время экспонирования увеличить до 1/2 с, то чувствительность в единицах ASA увеличится в 10 раз. Колбочки (дневное видение) в  $10^3$  раза менее чувствительны, чем палочки (сумеречное видение).

Зрачок контролирует количество света, попадающее в глаз в диапазоне, немного превышающем четыре ступени шкалы, — совсем не много, если учесть, что типичный объектив стандартного однообъективного зеркального фотоаппарата имеет по крайней мере шесть ступеней. Однако пороговая чувствительность сетчатки изменяется в зависимости от уровня падающего света в отношении 10 000:1. В гл. 7 и 8 будет показано, что светочувствительность пленки может быть изменена варьированием процесса обработки, но на практике это изменение ограничено приблизительно коэффициентом 4. Такое изменение пороговой чувствительности глаза, называемое *адаптацией*, обычно происходит менее чем за 1/10 с в дневных условиях, а для полной адаптации в темноте обычно требуется около 45 мин. Так как колбочки адаптируются мгновенно в условиях дневного света, яркость и цвет кажутся постоянными вне зависимости от световых условий при данном уровне освещенности.

Если фотографируемый или контрольный объект освещается дневным светом, то глаз может различать яркости в интервале примерно 1000:1. Самый лучший результат, который может быть достигнут в черно-белой печати, представляет интервал яркостей, меньший чем 100:1, а в черно-белом диапозитиве этот интервал составляет около 200:1.

Фактическая разрешающая способность глаза гораздо выше, чем его разрешающая способность, предсказанная с учетом aberrационных ограничений. Острота зрения увеличивается благодаря постоянному сканированию объекта глазом. Более детальное, производимое в уме воссоздание объекта осуществляется сравнением накопленной информации от этих многократных сканирований.

#### Другие фотохимические регистрирующие процессы

Фотографический процесс — это фотохимический процесс. Зерна галогенидов серебра, состоящие из упорядочение расположенных атомов серебра и галогена (например, хлора), при экспозиции на свету разрушаются под действием нескольких фотонов. Падающий фотон разрывает связь между атомами серебра и хлора в молекуле, и в результате освобожденный атом серебра соединяется с другими атомами серебра на поверхности зерна. Образовавшееся крошечное пятнышко серебра является носителем информации о том, что свет экспонировал эту часть пленки. Изображение не будет видимым, даже если его рассматривать на свету.

На стадии проявления экспонированные зерна галогенида серебра превращаются в зерна серебра, а с теми зернами, которые не подвергались воздействию света, такого превращения не происходит. В результате создается видимое негативное изображение. Так как неэкспонированные зерна галогенида серебра все еще светочувствительны, необходимо их или удалить, или превратить в любое соединение, нечувствительное к свету. В обычном процессе фиксированья неэкспонированный галогенид серебра удаляется. Стадия проявления представляет собой процесс значительного усиления, которое уникально среди многих фотохимических процессов. Только фотохимический процесс в глазу характеризуется большим усилением в стадии проявления. Фотографический процесс будет обсуждаться более подробно в гл. 7.

Один из давно известных фотохимических процессов — светокопирование — часто используется для размножения чертежей. Это процесс, в котором соли трехвалентного железа превращаются в соли двухвалентного железа под воздействием электромагнитного излучения. В одной из разновидностей этого процесса бумага покрывается железоаммониевой солью лимонной кислоты и калиевой солью железосинеродистой кислоты. Затем бумага экспонируется на очень ярком свету, проходящем сквозь чертеж на кальке, до тех пор, пока не образуется слабое изображение. Там, где свет попадает на бумагу, соединения трехвалентного железа переходят в соединения двухвалентного железа. При погружении бумаги в воду для проявления соединения трехвалентного железа превращаются в синеокрашенное цианидное соединение  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ , образуя негативное изображение. В этом процессе не требуется фиксирования, хотя изображение не особенно стабильно в течение длительного времени. С помощью такого процесса при использовании других химических соединений может быть

получен позитив. Стадия проявления в процессе светокопирования вызывает изменение цвета, но настолько незначительное, что любое усиление оказывается сравнимым с усилением, которое происходит при проявлении галогенидов серебра.

Диазопроцесс — еще один фотохимический процесс, широко применяемый для получения копий. В одной из его форм определенное диазосоединение (органическое соединение), вещество, регулирующее проявление (обычно кислота), а также краситель используются для образования на бумаге среды, создающей изображение. Диазосоединение после экспонирования ультрафиолетовым или фиолетовым светом в соответствующей химической среде (например, щелочи) превращается в почти бесцветное соединение. В этой же самой среде неэкспонированное диазосоединение реагирует с красителем, образуя окрашенный азокраситель. Освещение проводят через прозрачный или полупрозрачный оригинал. Регулирующее вещество обычно ингибитирует процесс окрашивания, однако используемое основание, такое, как газообразный аммиак, нейтрализует кислотное регулирующее вещество в течение экспонирования. Те части светочувствительной бумаги, которые находились в тени под непрозрачными участками оригинала, становятся окрашенными. Экспонирование и проявление могут протекать параллельно, однако в некоторых системах эти процессы разделены во времени. При проявлении наблюдается изменение цвета, но усиление при этом гораздо слабее, чем при проявлении галогенидов серебра. Не требуется фиксирования, хотя диа-позитив не очень стабилен в течение длительного времени.

В *термографическом процессе* оригинал экспонируется длинноволновым инфракрасным излучением. Термографическая бумага для получения копий сенсибилизована материалом, химический состав и цвет которого меняются不可逆地 при нагревании. Поскольку темные участки оригинала поглощают большую энергию излучения, чем светлые области, термографическая бумага при контакте с оригиналом сильнее нагревается в местах, соприкасающихся с темными поверхностями оригинала, что приводит к изменению ее цвета и созданию позитивной копии. Рассмотренный процесс также фотохимический, но光子 взаимодействуют не с индивидуальными атомами в светочувствительной среде, а с агрегатами атомов, причем экспозиция и проявление протекают в одну стадию. При этом не требуется фиксирования, хотя копия не очень стабильна<sup>1)</sup>. В процессе проявления нет усиления, но есть изменение цвета.

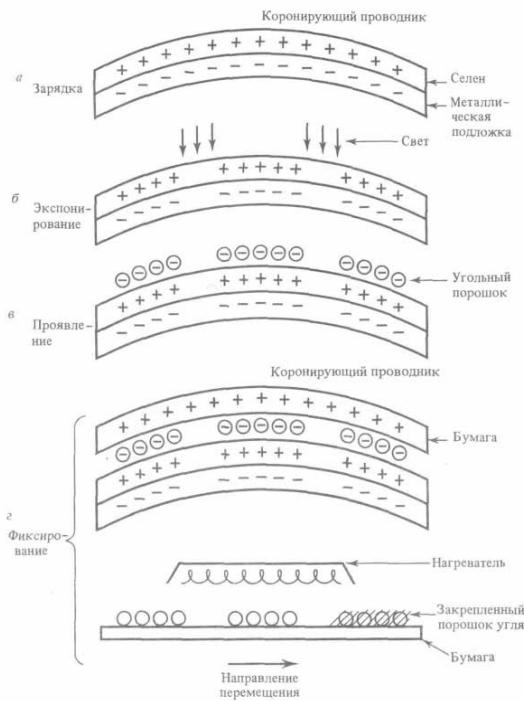
1) Долго хранить эти копии нельзя, поскольку при хранении под действием тепла окружающей среды потемнение распространяется по всему слою. — Прим. перев.

### Электрофотографические процессы

Обсуждаемые электрофотографические процессы регистрации разделим на два класса: 1) ксерография, в которой изображение создается на копировальной бумаге; 2) электронная запись информации, хорошо известным примером которой является видеокамера. Во всех рассматриваемых процессах в качестве светочувствительного материала используется *фотопроводник* или *фотоэмиттер*. В темноте фотопроводники являются изоляторами, но под действием света они становятся электрическими проводниками. С другой стороны, фотоэмиттеры при освещении их светом испускают электроны, особенно если фотоэмиттер помещен в откаченную колбу и к нему приложено соответствующее электрическое напряжение.

В ксерографии фотопроводящий материал (такой, например, как селен), нанесенный на металлическую подложку (часто имеющую форму цилиндра), действует подобно светочувствительному материалу.

Схема ксерографического процесса представлена на рис. 6.6. Металлический цилиндр с нанесенным



**Рис. 6.6.**  
Схема ксерографического процесса на него светочувствительным слоем аморфного селена вращается вблизи коронирующего устройства — нитевидного проводника под высоким напряжением. Электрическое поле проводника вызывает электризацию полупроводникового слоя.<sup>1)</sup> (рис. 6.6,и). Когда свет, отраженный от оригинала, освещает цилиндр (рис. 6.6,б), происходит экспонирование равномерно заряженного сенсибилизированного слоя. Светлые участки оригинала отражают значительную часть падающего света, который, достигая цилиндра, делает его проводящим, вследствие чего индуцированный заряд нейтрализуется. Темные участки оригинала отражают мало света, и поэтому заряд остается на неосвещенных участках, создавая «скрытое изображение». В стадии проявления на цилиндр напыляют (рис. 6.6,в) угольный порошок,

смешанный с порошком термочувствительной смолы, или порошок окрашенной синтетической смолы. Порошок, заряжаемый трением, осаждается на заряженных участках цилиндра<sup>2)</sup>. Когда электростатически заряженные листы бумаги находятся в контакте с цилиндром, часть заряженного порошка переносится на бумагу (рис. 6.6,г). Процесс фиксации завершается прохождением бумаги под излучателем тепла, который плавит смолу и закрепляет перенесенный порошок на бумаге. На разных стадиях описанного процесса используется свойство разноименных зарядов притягиваться и одноименных — отталкиваться.

Ксерография дает удовлетворительные копии штриховых оригиналов и печатных материалов, однако большие темные участки воспроизводятся плохо, поскольку остаточные заряды на них отталкиваются друг от друга и выстраиваются по периметру участка. Отсутствие заряда и, следовательно, порошка в центре таких участков приводит к их посветлению. Копия является позитивом, и для устранения обращения изображения справа налево используют зеркало при отображении света от оригинала на цилиндр. Можно показать, что сколь бы мало ни было усиление во время проявления, по значению оно такое же, как при проявлении галогеносеребряных материалов.

Все передающие телевизионные камеры имеют уникальную особенность по сравнению с другими регистрирующими системами, обсуждавшимися до сих пор. Изображение, сформированное на фоторегистрирующей поверхности, сканируется определенным образом<sup>3)</sup> и регистрируется последовательно во времени. В бытовых телевизионных системах время сканирования составляет около 1/30 с. В течение этого времени зонд (часто электронный пучок) поточечно развертывает изображение на фоторегистрирующей поверхности, непрерывно сканируя по горизонтали слева направо, начиная с верхнего левого угла изображения.

<sup>1)</sup> Полупроводниковое покрытие под воздействием электрического поля превращается в светочувствительный электрофотографический слой. — Прим. перев.

<sup>2)</sup> Порошок несет заряд, противоположный заряду скрытого изображения. — Прим. перев.

<sup>3)</sup> Каждый предмет можно рассматривать как комбинацию очень большого числа точек с разной отражательной способностью. — Прим. перев.

Рис. 6.7.

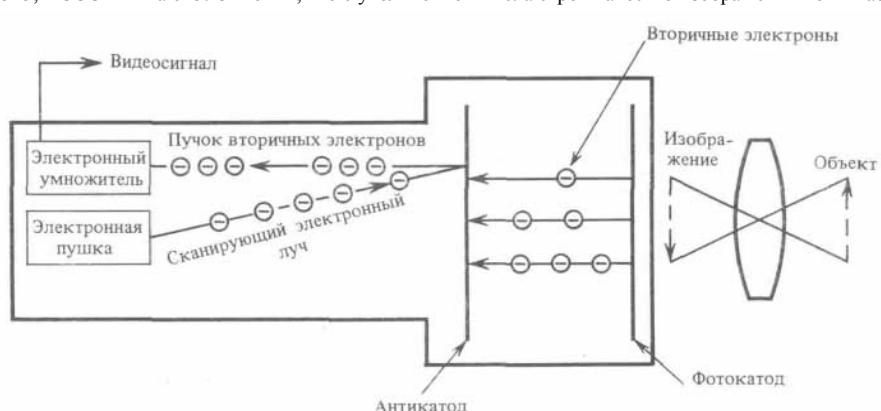
Сканирование поверхности экрана электроннолучевой трубы бытового телевизора.

Когда зонд достигает правой стороны, он возвращается на левую сторону и смещается немного вниз на следующую строку. Для формирования кадра обычно используется 525 горизонтальных строк<sup>1)</sup>. Вертикальный интервал развертки таков, что поверхность экрана электронно-лучевой трубы сканируется дважды за каждые 1/30 с. Последовательность сканирования схематически показана на рис. 6.7<sup>2)</sup>.

Электронно-обработанная информация используется для модулирования электромагнитной волны, передаваемой к телевизионному приемнику, либо записывается на магнитной видеоленте (подобной ленте, используемой для магнитофонной записи). Этот способ в некотором отношении аналогичен фотографированию камерой с шторным фотозатвором. В обоих случаях регистрация изображения растянута во времени. Однако при фотографическом регистрации (например, фотокамерой с центральным затвором) изображение не обязательно развернуто во времени. Развертка во времени не обязательна и в случае видеозаписи; чтобы достичь разрешения, сравнимого с разрешением серийной аппаратуры, для мгновенной записи информации необходимо генерировать  $3 \cdot 10^5$  ( $525^2$ ) импульсов.

Однако это не приемлемо по техническим причинам. Точно так же, как и в случае шторного фотозатвора, сканирующая техника налагает некоторые ограничения на использование видео-регистрирующих систем (например, размытость изображения вследствие движения предмета в процессе развертки), хотя эти ограничения во многих случаях несущественны. В период развития коммерческого телевидения использовалось множество различных типов передающих телевизионных трубок.

<sup>1)</sup> Число строк варьируется в системах телевидения разных стран. Так, в Англии изображение раскладывается на 405 строк, в США — на 525, в СССР — на 625. Отметим, что с увеличением числа строк качество изображения повышается. — Прим. перев.



<sup>2)</sup> Для уменьшения мелькания изображения процесс развертки осуществляется так, что луч проходит сначала все нечетные строки, а затем возвращается и проходит по четным строкам — так называемая «чересстрочная развертка». — Прим. перев.

Рис. 6.8.

Схема получения изображения в суперортоне передающей телевизионной камеры.

Суперортон представляет собой довольно современный пример таких трубок, в которых для регистрации изображения используется фотоэмиттер. В этом устройстве изображение объекта (рис. 6.8) фокусируется на фотокатод, помещенный внутри вакуумированного стеклянного баллона. Фотокатод представляет собой тонкий элемент, покрытый фотоэмиттером — одним из наиболее активных металлов (например, натрием). Электроны, испущенные фотоэмиттером, ускоряются электрическим полем и достигают экрана антикатода. Число фотоэлектронов в некоторой точке антикатода пропорционально числу фотонов, освещавших соответствующую точку фотокатода. Электронный пучок поточечно сканирует антикатод и нейтрализует фотоэми-тированные электроны. В результате нейтрализации модулируется (уменьшается) пучок обратных электронов пропорционально числу фотоэлектронов, которые находятся в каждой точке антикатода. Полученный модулированный пучок усиливается электронным умножителем, и результирующий электрический сигнал используется для регистрации видеинформации на магнитной ленте или для модуляции телевизионного сигнала. «Экспонирование» соответствует той стадии процесса, которая включает освещение фотокатода и достижение фотоэлектронами антикатода. «Проявление» — сканирование антикатода и электронное усиление. «Фиксирование» — регистрация информации на магнитной ленте. В рассмотренной системе происходит значительное усиление в процессе «проявления». Видикон (рис. 6.9) — пример передающей телевизионной трубы, в которой для регистрации светового изображения применено фотосопротивление. Оптическое изображение фокусируется на фотопроводящей мишени, помещенной внутри вакуумированного баллона.

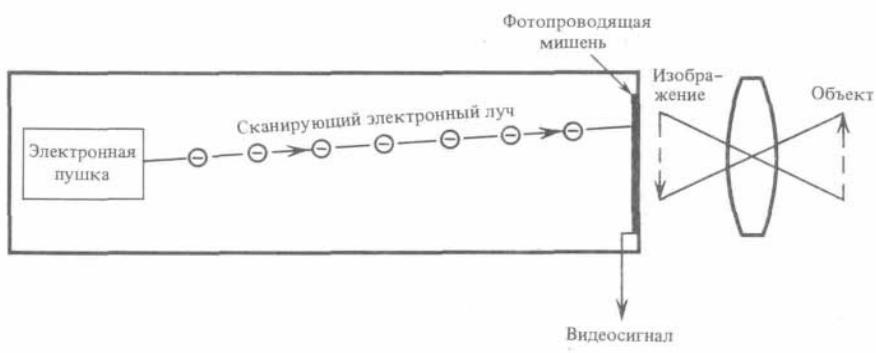


Рис. 6.9.

Схема устройства видикона. В темноте фотопроводник (например, сульфид кадмия) не обладает свободными электронами, поскольку они связаны с его атомами. Когда фотон попадает на фотопроводник, электрон внутри материала возбуждается настолько,

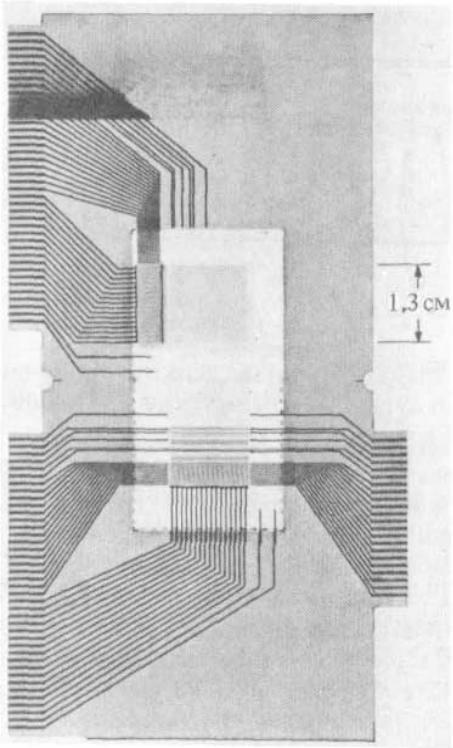
что может свободно двигаться в некоторой ограниченной области, где материал становится проводником. Для генерации электрического сигнала требуется ток, т. е. должна возникнуть замкнутая цепь с приложенным к ней напряжением.

Замкнутая цепь создается сканирующим электронным пучком под воздействием соответствующего напряжения.

Величина тока пропорциональна числу фотоэлектронов (и, следовательно, падающих фотонов), возбужденных в каждой точке фотосопротивления. По мере того как электронный пучок сканирует фотопроводящую мишень, возникает ток, пропорциональный числу фотонов, которые падают на каждую точку фотопроводника. Этот изменяющийся сигнал усиливается и регистрируется на магнитной пленке или используется для модуляции телевизионного сигнала. «Экспонирование» в этой системе соответствует появлению свободных фотоэлектронов в фотопроводнике, «проявление» — созданию тока с помощью сканирующего пучка и последующему усилинию сигнала, «фиксация» — регистрации изображения на магнитной пленке. В процессе проявления происходит значительное усиление сигнала. Главной общей чертой двух рассмотренных выше устройств является использование сканирующего электронного пучка. Специальные полупроводниковые устройства, принадлежащие к семейству интегральных схем, — еще одна группа устройств для регистрации оптических изображений. Интегральная схема представляет собой подложку (пластина из кремния, сапфира или стекла), на которой формируется тем или иным способом сложная электрическая цепь. Изготовление интегральной схемы включает напыление и (или) имплантацию ионов металлов и диэлектриков на подложку через соответствующие маски, а также тепловую обработку собранной системы. В результате фотопроводники, усилители и переключатели монтируются на одной пластинке<sup>1)</sup> (рис. 6.10). Этот класс фотодетекторов включает самосканирующуюся матрицу и устройство с зарядовой связью.

Фотопроводящие поверхности, используемые для регистрации изображения, состоят из дискретных ячеек, электрически изолированных от соседних элементов.

<sup>1)</sup> В настоящее время разрабатываются интегральные схемы, содержащие более  $10^6$  транзисторов на площади  $1,6 \text{ см}^2$ . Такие схемы уже выпускаются опытными партиями, а в стадии разработки находятся интегральные схемы, на которых размещаются  $4 * 10^6$  транзисторов. — Прим. перев.



**Рис. 6.10.**

Фотография двух интегральных тонкопленочных светочувствительных детекторов, закрепленных на двух стеклянных подложках (в центре). Подложки смонтированы на общей панели, темные линии — электрические проводники для подключения интегральных схем в цепь (Воспроизведется с разрешения П Веймера)

Например, детектор на верхней подложке, показанной на рис. 6.10, представляет собой набор из 256 элементов в форме квадрата, общая площадь которых немного меньше 1  $\text{см}^2$ . Каждый элемент фотодетектора регистрирует электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна числу фотонов, попадающих на этот элемент. Вместо сканирующего электронного луча используется электронное сканирование набора элементов. Электрический сигнал усиливается полупроводниковыми усилителями и затем регистрируется на магнитной пленке. В процессе проявления (стадии сканирования и полупроводникового усиления) происходит значительное усиление.

#### Сравнение светорегистрирующих систем

Рассмотренные системы регистрации можно сравнить по следующим характеристикам: светочувствительность, разрешающая способность, объем регистрируемой информации, диапазон регистрируемых яркостей,

способность быстро формировать и воспроизводить изображение, уровень стабильности зарегистрированных изображений, спектральная чувствительность и удобство эксплуатации. Если рассматриваются устройства на основе фотоэмиттеров и (или) фотопроводников в качестве составляющих частей телевизионной системы то делается вывод, что главными достоинствами такой системы являются очень высокая чувствительность (способность образовывать изображение при очень низких уровнях света) и способность создавать изображение практически мгновенно. Предельная чувствительность передающей телекамеры на порядок величины, т. е. примерно в 10 раз, превосходит чувствительность ближайшего конкурента — глаза. Большинство остальных характеристик системы не лучше, чем у галогеносеребряного процесса, используемого и в настоящее время.

Основными достоинствами ксерографии являются низкая стоимость отпечатков, быстрота их получения и удобство эксплуатации оборудования. Еще одним достоинством является возможность использования обычной бумаги в качестве подложки, а также то, что процесс является сухим. Однако по сравнению с хорошими фотографиями качество самого лучшего ксерографического изображения очень плохое. Термография, когда-то конкурировавшая с ксерографией, во многих отношениях хуже ее, и поэтому почти не применяется.

Процесс светокопирования и менее распространенный диазопроцесс сначала использовались для размножения чертежей. Оба процесса наилучшим образом подходят для этой цели и поэтому используются в настоящее время. Процесс светокопирования недорогой, быстрый и с его помощью можно получать копии больших оригиналов в натуральную величину. Процесс дает изображение, качество которого хуже по сравнению с изображением, получаемом в галогеносеребряном процессе. При оценке галогеносеребряного процесса по характеристикам, упомянутым в начале этого раздела, оказывается, что этот процесс весьма конкурентоспособный. Его чувствительность уступает только чувствительности глаза и некоторых фотоэлектрических процессов. Достигаемое им разрешение теоретически могли бы превысить некоторые фотоэмиттерные и фотопроводниковые устройства, но такие устройства еще не созданы. Галогеносеребряный процесс обеспечивает больший объем регистрируемой информации, чем любая из упомянутых выше систем. Процесс может регистрировать значительный диапазон яркости (но меньший, чем глаз), хотя реакция фотопроводниковых и фотодетекторных устройств более линейна относительно этого параметра. Сохранность зарегистрированного на фотографии изображения, вероятно, более высокая, чем для любой из перечисленных выше систем.

В настоящее время спектральная чувствительность галогеносеребряного процесса лучше, чем у любой другой обсуждавшейся здесь системы. Этот процесс не слишком дорогой, хотя с увеличением цен на серебро его стоимость также растет. Однако если стоимость является существенным фактором, то можно повторно использовать большую часть серебра. Самым существенным его недостатком

является неудобство рабочей процедуры и значительное время, необходимое для проявления и фиксации изображения. Процесс в основном мокрый и должен проводиться в темноте. Однако галогеносеребряный процесс применяется до сих пор и, вероятно, будет использоваться и в будущем.

Работа глаза уже сравнивалась с рассмотренными процессами. Регистрирующая система сетчатка—мозг превосходна и во многих отношениях лучше любого из рассмотренных здесь процессов. К сожалению, неизвестен способ ее дублирования в качестве регистрирующей системы вне зависимости от человеческого существования. Можно задать вопрос, будут ли когда-либо синтезированы органические системы, которые заменят все остальные процессы (включая галогеносеребряный). Все, что можно сказать, — это то, что галогениды серебра — наилучшие из доступных в настоящее время материалов.

### Упражнения

1. Рассмотрите оптические недостатки глаза. Какие необычные свойства глаза по сравнению с объективом фотоаппарата уменьшают aberrации?
2. Сравните механизмы фокусировки глаза и фотоаппарата.
3. Какие основные дефекты, врожденные или возрастные, свойственны глазу?
4. Сравните способ, с помощью которого изменяется чувствительность глаза и фотоаппарата. Как можно достичь сравнимых пороговых чувствительностей?
5. Опишите функции и распределения палочек и колбочек в глазу.
6. Опишите стадию «проявления» в каждой из следующих систем: человеческий глаз, галогеносеребряный процесс, процесс светокопирования, диазопроцесс, ксерография, телевизионно-регистрирующий процесс. Сравните степень усиления в стадиях «проявления» этих процессов.
7. Для каких типов изображений диазопроцесс превосходит фотографический? В каких случаях справедливо обратное?
8. Сравните относительные преимущества ксерографии и фотографии при записи изображения.

## Глава 7. Фотографический процесс

В этой главе рассмотрено строение фотоматериалов, в общих чертах описан фотографический процесс и представлен детальный механизм формирования изображения.

### Строение фотоматериалов

Основой (подложкой) (рис. 7.1) фотопленок обычно является прозрачный гибкий органический материал, а в некоторых случаях применяются стеклянные фотопластинки. Сначала в качестве основы для гибкой фотопленки использовался нитрат целлюлозы, но вследствие легкой воспламеняемости и общей химической неустойчивости нитрат целлюлозы заменили на более стабильный органический материал. В настоящее время фотокинопленки изготавливаются из полиэтилентерефталата (фирма Dupont называет этот материал кронаром, а Eastman — эстаром). Это соединение обладает достаточно стабильными химическими и механическими свойствами и в то же время является довольно гибким, чтобы его можно было использовать при изготовлении роликовой пленки.

Светочувствительные кристаллы галогенидов серебра и другие необходимые химические реагенты содержатся в тонком желатиновом слое, нанесенном на основу. Часто для достижения желаемого конечного результата на пленки наносят несколько фотографически активных слоев. Например, на высокочувствительные черно-белые фотопленки — по крайней мере два светочувствительных слоя. Эти светочувствительные слои называют *фотографической эмульсией*. Верхний слой желатины предохраняет эмульсию от механического повреждения. Когда свет падает на пленку, часть его поглощается зернами галогенида серебра, часть рассеивается эмульсией и часть достигает подложки, от которой он может отразиться или пройти сквозь нее. Свет, отраженный обратно в эмульсию от нижней границы основы, может поглотиться кристаллами галогенида серебра, вызывая тем самым ухудшение изображения.

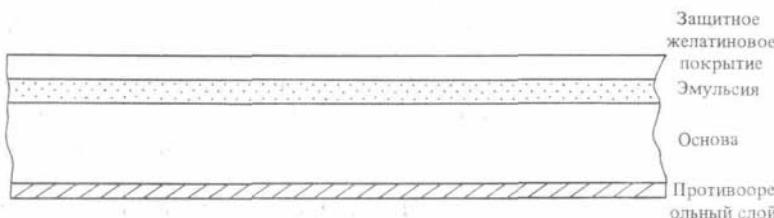


Рис. 7.1.

Схема строения черно-белой фотопленки. Чтобы уменьшить это отражение, нижнюю границу основы часто покрывают *противоореольным слоем*, который поглощает свет, достигающий этого слоя.

Противоореольное покрытие

удаляется в процессе проявления и не влияет на процесс фотопечати. Если точечный источник света

(например, уличный фонарь ночью) фотографируется с использованием пленки, не имеющей противоореольного слоя, то вокруг изображения образуется ореол, который вызван светом, отраженным от задней поверхности основы.

Бумажная основа фотографического материала для печати может покрываться лаком для уменьшения поглощения воды (или химических реагентов) волокнами бумаги. Лицевая сторона бумаги часто покрывается интенсивно-белым соединением (сульфатом бария), улучшающим отражательную способность бумаги. Эмульсия, которая может наноситься в виде многослойного покрытия, образует следующий слой, который вместе с защитным слоем желатины составляет верхнее покрытие фотобумаги.

Эмульсии для пленки и бумаги различаются только некоторыми деталями. Основой эмульсии является колloid (почти всегда желатина), который, обеспечивает механическое удержание кристаллов галогенида серебра. Фоточувствительный материал — это одно или несколько светочувствительных соединений галогенида серебра  $\text{AgX}$  (хлорид серебра  $\text{AgCl}$ , бромид серебра  $\text{AgBr}$ , иодид серебра  $\text{AgI}$ ). Кроме того, в желатину добавляют *сенсибилизирующие вещества* (главным образом соединения серы), которые увеличивают светочувствительность фотоэмульсии, воздействуя на поверхность зерен  $\text{AgX}$ . Свет, падающий на основу фотобумаги и отраженный от нее, дважды проходит через фотографическую эмульсию, а свет, падающий на прозрачную подложку фотопленки, — только один раз. Поэтому эмульсионный слой на бумаге более тонкий, чем на пленке. И оба они намного тоньше по сравнению с толщиной основы.

Обычно галогенид серебра составляет около 12% всего объема эмульсии негативного материала и около 6% в случае фотобумаги. Из трех галогенидов серебра иодид  $\text{AgI}$  наиболее чувствителен к свету, а  $\text{AgCl}$  наименее чувствителен. Поскольку пленка должна быть более чувствительна к свету, чем фотобумага, вещества  $\text{AgBr}$  и  $\text{AgI}$  следует преимущественно использовать для пленки, а  $\text{AgCl}$  и  $\text{AgBr}$  — для менее чувствительной бумаги. Однако  $\text{AgI}$  очень медленно фиксируется, что ограничивает его применимость в фотографических эмульсиях. Эмульсии фотопленок содержат зерна кристаллов бромида и иодида серебра. В эмульсии для бумаги от 30 до 95% галогенида серебра составляет  $\text{AgCl}$ , остальное  $\text{AgBr}$ . В более чувствительных («быстрых») бумагах содержится больше бромида серебра.

Чувствительность пленки зависит главным образом от размеров зерен в эмульсии. Размер зерна в основном определяется двумя стадиями процесса изготовления, называемыми *эмульгированием и созреванием*. На первой стадии кристаллы  $\text{AgX}$  диспергируются в желатине, образуя эмульсию, а на второй стадии происходит рост зерен и изменение распределения зерен по размерам в результате нагрева, предшествующего нанесению эмульсии на основу. Распределение зерен по размерам играет основную роль в определении контрастности пленки и фотобумаги. Если все зерна одинакового размера, пленка проявляет тенденцию к высокой контрастности. Средний диаметр зерен в мелкозернистой роликовой пленке составляет около 800 нм, а в высокочувствительной роликовой пленке — около 1100 нм.

Галогениды серебра чувствительны к синему свету и к электромагнитному излучению более высокой частоты. Фотоны, соответствующие свету с большей длиной волн (с более низкой частотой), не обладают достаточной энергией ( $E=h\nu$ ), чтобы необратимо изменить структуру  $\text{AgX}$  и образовать скрытое изображение. Хлорид серебра чувствителен к свету с более короткими длинами волн по сравнению с иодидом серебра. Бромид серебра обладает средней по длинам волн границей, не поглощая свет с длинами волн больше, чем приблизительно 500 нм. Смешанный кристалл, состоящий из 3%  $\text{AgI}$  и 97%  $\text{AgBr}$ , не поглощает свет при длинах волн больше, чем 540 нм. Чтобы сделать галогениды серебра чувствительными к свету в остальных частях видимого спектра, в эмульсию добавляют полимети-новые красители, где они адсорбируются поверхностью зерен галогенида серебра. Если добавленные красители повышают чувствительность эмульсии в зеленой области спектра, то пленки называются *orthoхроматическими*. Эмульсии, которые сенсибилизированы во всей видимой области спектра, называются *панхроматическими*.

#### **Основные принципы фотографического процесса**

Стандартный фотографический процесс может быть кратко изложен следующим образом. Фотопленка или фотобумага экспонируется в фотоаппарате или в фотоувеличителе. На поверхности зерен  $\text{AgX}$ , поглотивших значительное число фотонов, образуются мельчайшие крупинки серебра (*центры проявления*). Зерна, которые недостаточно освещались, остаются неизменными (рис. 7.2,*a*). Набор экспонированных зерен представляет собой скрытое изображение. Если бы эмульсию можно было рассматривать на этой стадии процесса, то никакого изображения нельзя было бы обнаружить невооруженным глазом, поскольку частицы серебра слишком малы.

Затем пленка (или бумага) проявляется с помощью выбранного восстановителя (проявителя), который превращает в чистое серебро зерна скрытого изображения (рис. 7.2,*b*). Частицы серебра действуют как катализатор в процессе проявления. Проявитель является донором электронов, и в процессе проявления электроны присоединяются к положительным ионам серебра, образуя атомы

металлического серебра.

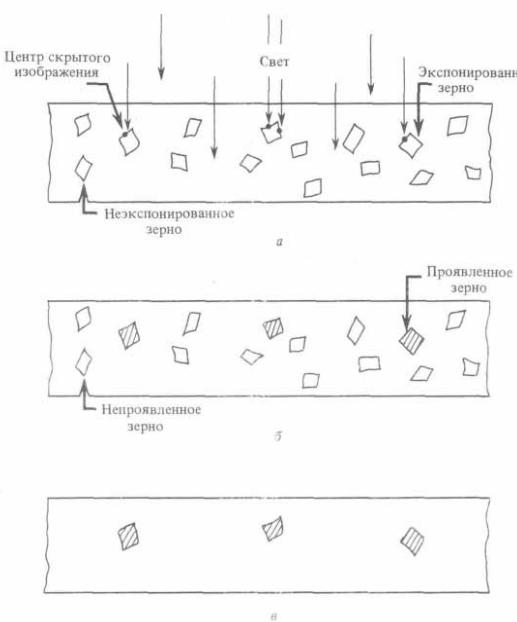


Рис. 7.2.

Экспонирование (а), проявление (б) и фиксирование (в) фотографической эмульсии

Если оставшиеся ионы серебра не удалить или не сделать их нечувствительными к свету, последующая длительная экспозиция на свету превратит их в атомы серебра, разрушая изображение. В процессе фиксирования неэкспонированные, практически нерастворимые в воде частицы галогенида серебра превращаются в растворимые в воде соединения, которые вымываются из эмульсии (рис. 7.2,в). Для прекращения проявления между стадиями проявления и фиксирования может использоваться фиксаж, или гипосульфит (гл. 1), который часто содержит кислоту, либо может применяться стоп-ванна. Фиксаж должен быть подобран таким образом, чтобы превратить неэкспонированные зерна галогенида серебра в соединения, растворимые в воде, но не растворить серебро изображения.

И наконец, пленка или бумага промываются для удаления побочных продуктов проявления и фиксирования. Если этого не сделать, побочные продукты будут со временем разрушать изображение. Поскольку фиксаж трудно удалить из пленки или бумаги, для того чтобы сделать изображение долговечным, иногда применяют специальные соединения для нейтрализации гипосульфита, превращающие некоторые продукты фиксирования в бесцветные стабильные соединения. Это особенно важно для фотографий, представляющих собой архивные документы.

### Структура зерен AgX

В твердом состоянии галогениды серебра образуют кристаллы. Идеальный монокристалл — упорядоченная решетка атомов (или ионов), расположенных так, что положение всех атомов в кристалле может быть вычислено, если известны координаты некоторых определенных атомов.

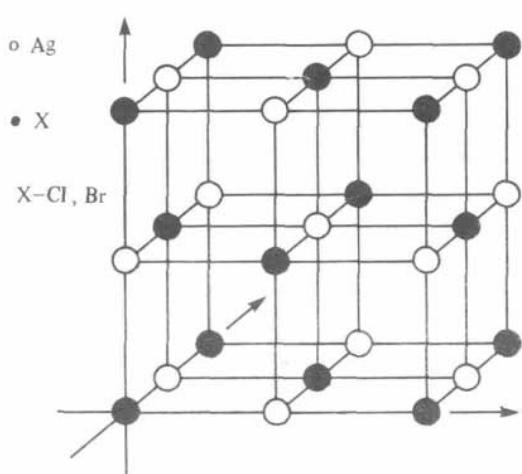


Рис. 7.3.

Кристаллическая решетка хлорида и бромида серебра.

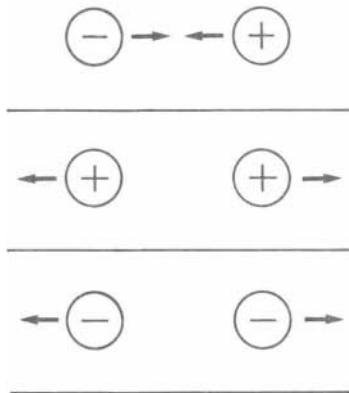
В кристаллах хлорида и бромида серебра ионы галогена расположены в вершинах и в центрах граней куба (рис. 7.3). Ионы серебра расположены аналогичным образом, причем образуемый ими куб смешен относительно куба, определяемого ионами галогена. Такие кристаллы относятся к классу гранецентрированных кубических (ГЦК) кристаллов. Кристалл в целом может быть представлена повторением структуры, изображенной на рис. 7.3, во всех трех направлениях (обозначенных стрелками). Если хлорид и бромид серебра осаждаются одновременно, то могут быть образованы смешанные ГЦК-кристаллы, в которых углы решетки заняты

ионами как хлора, так и брома. Иодид серебра при комнатной температуре и атмосферном давлении образует иную структуру. Однако в присутствии малых концентраций AgJ бромид и иодид серебра образуют смешанные ГЦК-кристаллы.

Расстояние между атомами серебра вдоль ребер куба, которое зависит от концентрации галогена, составляет 0,55 нм для чистого хлорида серебра. Форма кристаллов зависит от процесса осаждения. Они могут быть кубическими, октаэдрическими, пластинчатыми или нерегулярными. Однако внутренняя структура всегда такая, как на рис. 7.3. Так как диаметр типичного зерна составляет приблизительно 1000 нм, оно содержит примерно  $[1000 \cdot 10^{-9} / (0,5 \cdot 10^{-9})]^3 = 8 \cdot 10^{10}$  гранецентрированных кубиков, подобных изображенному на рис. 7.3, и примерно по  $3 \cdot 10^{10}$  ионов серебра и галогена.

Рис. 7.4.

Притяжение разноименно заряженных и отталкивание одноименно заряженных частиц.



Если на такой кристалл попадает достаточное количество света, галогенид серебра превратится в металлическое серебро и зерна будут казаться черными. Это случай так называемой «дневной печати». Хотя количество света, необходимое для осуществления этого процесса, очень велико, большинство позитивов до конца XIX в. делалось именно таким образом. В современном фотографическом процессе на поверхности зерна до четырех атомов серебра концентрируются в одну частицу, образуя центр скрытого изображения (рис. 7.2,а) и делая возможным проявление этого зерна. В процессе проявления оставшееся в экспонированном зерне серебро превращается в металлическое серебро. Таким образом, стадия проявления является процессом, характеризующимся огромным коэффициентом усиления —

теоретически порядка  $10^{10}$ . Действительное усиление на порядок величины меньше.

Ионы в ионном кристалле удерживаются в своих положениях *электростатическими силами*.

Примером таких сил является притяжение разноименно заряженных тел или отталкивание одноименно заряженных тел (рис. 7.4). Рассмотрим простейшую модель атома — *модель Бора*. В этой модели атом состоит из тяжелого ядра, образованного положительно заряженными *протонами* и незаряженными *нейтронами*, и окружающих ядро отрицательно заряженных *электронов*. Модели Бора атомов серебра и брома показаны на рис. 7.5.

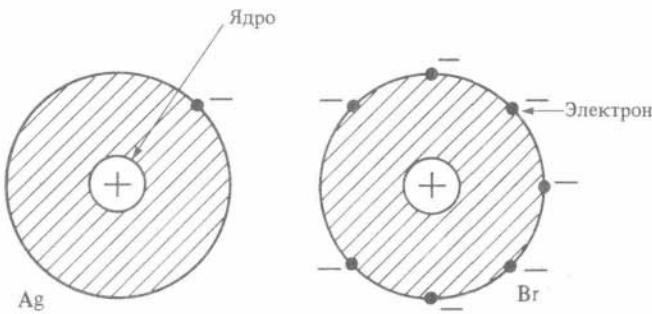


Рис. 7.5.

Модели Бора атомов серебра и брома.

Если число электронов равно числу протонов, то общий заряд атома равен нулю. Электроны движутся по определенным орбитам и образуют оболочки атома. Внешняя оболочка атома серебра содержит только один электрон, а атома брома — семь электронов. Когда

атомы серебра и брома находятся вблизи друг друга (как, например, в кристалле), притяжение неспаренного электрона атома серебра к ядру значительно ослабляется, и он переходит к атому брома, благодаря чему и возникают силы, удерживающие атомы в решетке кристалла. После перехода электрона атом серебра приобретает положительный заряд, а атом брома — отрицательный, т.е. они становятся ионами.

У реального кристалла имеются отклонения от идеальной структуры, описанной выше. Вследствие нарушения равновесных условий роста, захвата примесей при кристаллизации под влиянием различных воздействий в структуре кристалла возникают нарушения — так называемые *дефекты*. Дефект Френкеля возникает, когда ион серебра уходит из своего нормального положения в решетке и свободно блуждает в ней. Такие ионы играют важную роль в образовании скрытого изображения.

Место в решетке, покинutое ушедшими ионом, называется *вакансиеи*.

#### Образование скрытого изображения

В 1938 г. Гарни и Мотт предложили модель образования скрытого изображения, которая с некоторыми изменениями до сих пор считается справедливой, поскольку согласуется с результатами многих экспериментов, предпринятых для ее проверки. Предположим, что, когда фотон проникает в кристалл галогенида серебра, он освобождает слабосвязанный электрон (рис. 7.6,а), который начинает двигаться внутри решетки кристалла (рис. 7.6,б). В результате этого процесса в узле, откуда был выбит электрон, возникает положительный заряд. Свободный электрон может быть захвачен либо узлом, из которого он ушел, либо любым другим узлом, который имеет средство к электрону. Если осуществляется первый процесс, то, вероятно, он не приводит к образованию скрытого изображения.

Сенсибилизирующими примесями в эмульсии, о которых упоминалось выше, приписывается важная роль на данном этапе образования скрытого изображения. Предполагается, что атомы серы этих соединений рекомбинируют с атомами серебра на поверхности зерен, образуя соединение  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Так как область вокруг  $\text{Ag}_2\text{S}$  более «предпочтительна» для электронов по сравнению с областью около  $\text{AgX}$ , она представляет собой более вероятное место локализации электрона и образования пятна металлического серебра на поверхности зерна. Предположим, что электрон локализуется на таком участке поверхности кристалла. Эта ситуация изображена на рис. 7.7 в плоскостной модели решетки. В центре решетки показан нейтральный атом галогена, который представляет собой узел, из которого электрон был выбит фотоном.

Рис. 7.6.

Схема образования скрытого изображения.

В физике твердого тела узел с отсутствующим электроном называется *дыркой*. Электрон на ближайшем ионе галогена может мигрировать к этому узлу, вызывая тем самым движение дырки, показанное штриховой линией на рис. 7.7.

Общим результатом такого процесса является перемещение нейтрального атома галогена на поверхность кристалла. Эта стадия символически изображена на рис. 7.6,в. Желатина содержит соединения (включая соединения серы), которые легко реагируют с галогенами. Поскольку нейтральный атом галогена, расположенный на поверхности кристалла, не связан с решеткой, он может легко соединяться с добавками с образованием стабильных соединений галогена в желатине (рис. 7.6,г). В следующей стадии процесса участвует свободный ион серебра, который может возникать в результате образования дефекта Френкеля. Этот ион, показанный на рис. 7.7Д способен блуждать по кристаллу вследствие теплового возбуждения.

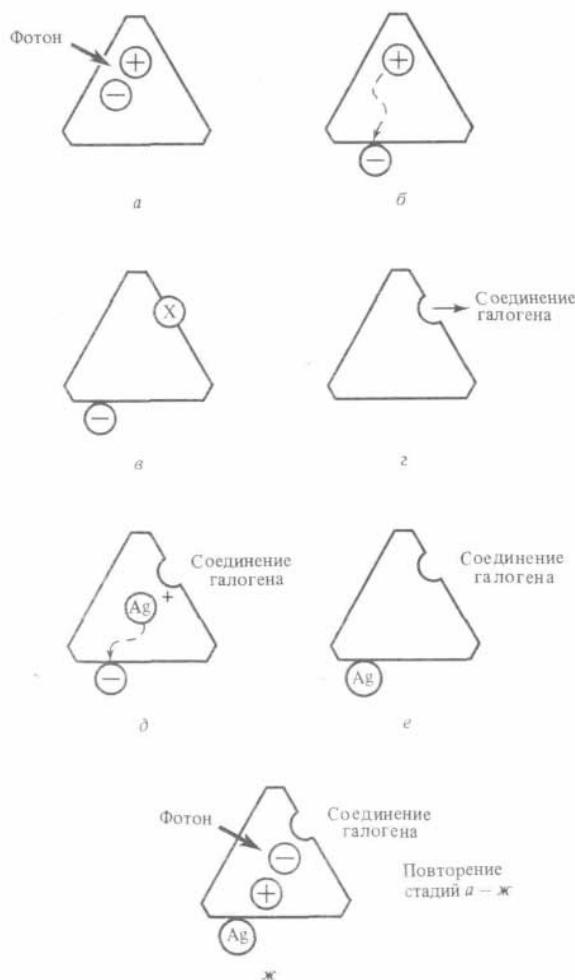
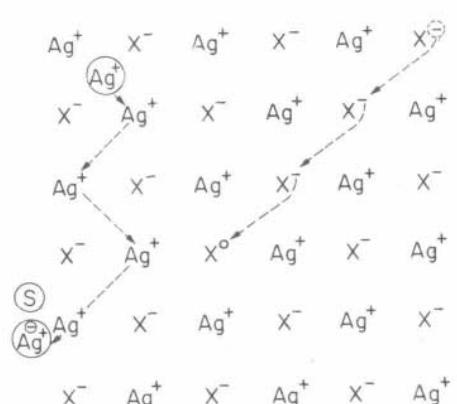


Рис. 7.7.  
Плоскостная модель решетки  $\text{AgX}$

Однако вследствие слишком больших размеров он не может свободно перемещаться между другими атомами решетки, и поэтому блуждание иона серебра (штриховая линия на рис. 7.7) происходит в результате последовательного взаимного замещения ионов серебра в решетке, которые поочередно становятся свободными. В отсутствие сил притяжения это блуждание хаотично. Электрон, локализованный около молекулы  $\text{Ag}_2\text{S}$ , представляет собой слабый центр притяжения; свободный ион серебра и локализованный электрон несут нескомпенсированные заряды в этой части кристалла. Если ион серебра расположен достаточно близко, он приближается к электрону (рис. 7.6,д и 7.7), и они

нейтрализуют друг друга (рис. 7.6,е), образуя нейтральный атом серебра на поверхности кристалла. Второй фотон может снова инициировать процесс (рис. 7.6,ж), и все стадии повторятся. Единичный нейтральный атом серебра, расположенный на поверхности зерна, недостаточно стабилен и может быть вновь легко ионизован. Если описанные процессы повторяются в течение короткого времени так,



что в месте расположения молекулы  $\text{Ag}_2\text{S}$  образуются примерно четыре атома серебра, возможно, что пятно металлического серебра станет стабильным и зерно — способным к проявлению. Скопление таких зерен и образует скрытое изображение. Если свет не падает на зерно, пятна металлического серебра не образуются, и зерно не будет быстро проявляться.

Если в желатине присутствует значительное количество серы, на поверхности зерна может образоваться много локализованных узлов, и в результате возникают дополнительные возможности распределения электронов, которые препятствуют образованию стабильного пятна серебра на поверхности зерна. Поскольку зерно становится способным к проявлению, если на нем собираются вместе четыре атома серебра, число зерен, способных к проявлению, не пропорционально интенсивности света при низких уровнях освещенности. Когда освещенность велика, освобождается так много электронов и образуется так много дырок, что некоторые электроны и дырки рекомбинируют внутри зерна. Это мешает электронам достигать молекул  $\text{Ag}_2\text{S}$  на поверхности зерна, и образование проявляемых зерен также не пропорционально освещенности. Отсутствие пропорциональности усугубляется тем, что каждая молекула  $\text{Ag}_2\text{S}$  может поглотить только один электрон за один раз. Каждый электрон, образно говоря, «ждет в очереди», чтобы г поглощенным. Более подробно вопросы образования изображения обсуждены в работах<sup>1), 2)</sup>.

### Проявители

Чтобы проявить эмульсию, т. е. скрытое изображение превратить в видимое, необходимо выбрать восстановитель, чтобы проявить до серебра зерна, которые экспонировались на свету, и сохранить неизменными зерна, которые не экспонировались. Такой идеальный случай практически недостижим, так как некоторые недоэкспонированные зерна всегда проявляются, создавая фоновую вуаль. Часть этой вуали вызывается зернами, которые были возбуждены термически или проникающим излучением, и вносит нежелательный вклад в скрытое изображение. Если пленку держать в проявителе длительное время при достаточно высокой температуре, то весь галогенид серебра будет превращен в серебро. Для достижения хорошего проявления надо использовать подходящий проявитель при определенных температурах и временах обработки. Проявителями могут быть как органические, так и неорганические соединения, но в настоящее время главным образом применяются ароматические соединения — производные бензола.

Бензол  $\text{C}_6\text{H}_6$  — углеводород с шестью атомами углерода, связанными друг с другом и с атомом водорода (рис. 7.8). Каждая черточка на структурной формуле обозначает химическую связь.

Органические проявители получаются замещением присоединенных атомов водорода соответствующими группами, такими, как гидроксил ( $\text{OH}$ ) или аминогруппа ( $\text{NH}_2$ ) (см. рис. 7.8,б—г, где в структурных формулах для простоты опущены обозначения атомов углерода и водорода). Эти проявляющие соединения классифицируются по трем обширным группам. Первая группа содержит ди- и полигидроксильные соединения, одним из которых является гидрохинон (рис. 7.8,б). Вторая группа состоит из аминогидроксисоединений, примером которых является *n*-аминофенол (рис. 7.8,в). Третья группа включает ди- и полiamиносоединения, например *n*-фенилendiамин (рис. 7.8,г).

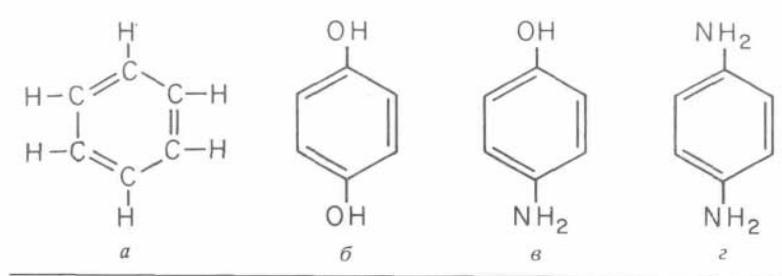


Рис. 7.8.

Структурные формулы бензола (а) и проявителей — гидрохинона (б), *n*-аминофенола (в) и *n*-фенилendiамина (г).

<sup>1)</sup> Slifkin L. M., Sci. Prog. Oxf., 60, 151—167, 1972.

<sup>2)</sup> Чубисов К. В. Общая фотография. — М.: Искусство, 1984. — Прим. перев.

Аминосоединения представлены на рис. 7.8 в виде свободных

оснований, но обычно они выпускаются в виде солей, которые стабильны и достаточно хорошо растворимы в воде. Например, *n*-аминофенол — в виде сульфата под торговым названием Kodak Elon (Eastman Kodak) или метол (Hars-haw Chemical Co.). Существуют и другие органические проявители (например фенидон, производимый компанией Ilford Chemical Co.), которые не относятся к перечисленным выше группам. Более полно проявители обсуждаются в книге Кэрролла и ДР.

Проявители в водных растворах образуют ионы водорода. Концентрация этих ионов, мерой которой является величина pH, влияет на скорость восстановления проявителем галогенида серебра до металлического серебра. Концентрацию ионов водорода можно регулировать введением щелочи в проявитель во время приготовления последнего. Такие щелочи называются ускорителями; их обычные примеры —  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ , карбонаты натрия и калия и сложные соединения бора и натрия (бораты). Карбонат натрия — это обычная стиральная (кальцинированная) сода и бура — имеющиеся в продаже соединение бора. Кроме регулирования

величины pH раствора ускорители стабилизируют уровень pH в течение срока службы проявителя. В проявитель обычно добавляются сульфитные соединения (например, сульфит натрия), иногда называемые сульфитами. Основные функции сульфита — действовать в качестве очистителя от использованного проявителя и в качестве стабилизатора, ингибирующего окисление проявителя кислородом воздуха. В процессе восстановления галогенида серебра до металлического серебра проявитель окисляется. Использованный проявитель изменяет скорость проявления, что обычно нежелательно. Соединения, образовавшиеся при реакции сульфита с использованным проявителем (в основном сульфонаты — соли сульфоновой кислоты), могут также влиять на процесс проявления, но более контролируемым образом по сравнению с самими продуктами окисления. Сульфит реагирует с кислородом воздуха, уменьшая окисление проявителя, но механизм этого процесса полностью не понят. Сульфит может также действовать как слабый растворитель зерен галогенидов серебра, что важно для некоторых мелкозернистых проявителей. Наконец, большинство проявителей содержит замедлитель (например, бромид калия), который действует как противовуалирующее вещество. По мере протекания процесса проявления бромид калия в окрестности центров проявления стремится замедлить проявление. Однако замедление обратно пропорционально скорости проявления.

<sup>1)</sup> В H Carroll, G C Higgs, T H James, *Introduction to Photographic Theory*, New-York. John Wiley, 1980, p 196ff.

Проявление сильно экспонированных (быстро проявляющихся) зерен замедляется меньше, чем слабо экспонированных зерен. Так как вуаль возникает вследствие проявления неэкспонированных зерен, малое количество бромида калия весьма эффективно предотвращает образование вуали. К сожалению, большие концентрации бромида стимулируют растворение галогенида серебра, который в растворе проявляется легче, чем в форме гранул, что может привести к вуали.

### Проявление

Процесс проявления может быть рассмотрен как *физическое проявление* и как *химическое проявление*. Обычно под физическим проявлением понимают процесс, в котором галогениды серебра сначала растворяются, а затем превращаются в серебро в растворе. Строго говоря, в растворе галогенид серебра может образовываться из зерна либо быть введен в него на какой-либо стадии процесса. Джеймс<sup>1)</sup> называет этот процесс физическим проявлением в растворе. Под химическим проявлением понимают процесс, в котором галогенид серебра в зерне превращается прямо в серебро. Джеймс называет этот процесс прямым проявлением. Обычно при проявлении скрытого изображения протекают процессы проявления обоих типов.

В процессах проявления проявитель, отдавая электроны галогениду серебра, разрушает связь между серебром и галогеном, что способствует рекомбинации атомов серебра с образованием зерен серебра. Пятно серебра скрытого изображения, вероятно, действует как *катализатор* процесса проявления и как центр образования зерна серебра.

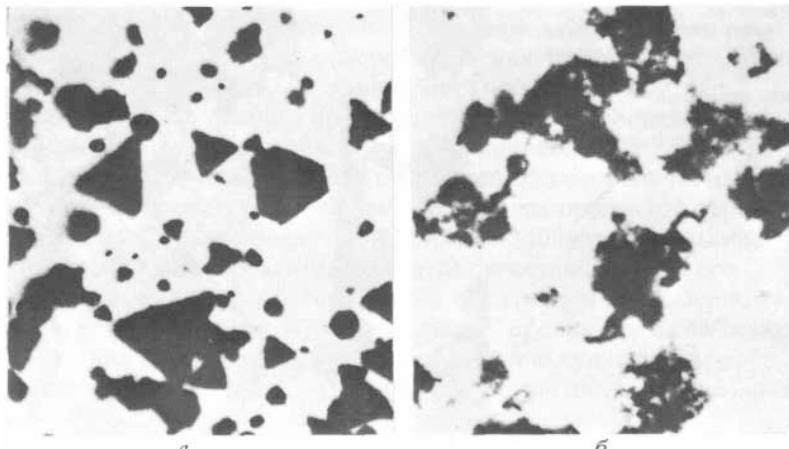
Так как проявитель не содержит галогенида серебра, сначала в нем должно раствориться некоторое количество галогенида серебра, чтобы могло происходить физическое проявление в растворе. Скорость растворения зависит от вида используемого проявителя и от добавок в нем. Очевидно, пятно серебра скрытого изображения способствует растворению галогенида серебра экспонированного зерна. Если проявитель очень активный и(или) время проявления значительно увеличено, то неэкспонированные зерна галогенида серебра растворяются и проявляются. Если серебро, образованное в этом процессе, осаждается на экспонированное зерно, то это приводит к увеличению размеров зерна по сравнению с другими, что может привести к чрезмерной зернистости негатива. С другой стороны, это дополнительное серебро может образовать новые зерна, которые приводят к фоновой вуали.

Процесс проявления изучали с использованием оптического и электронного микроскопов.

Обнаружено, что зерна серебра, образованные в случае чисто физического проявления в растворе, по форме не похожи на исходные зерна галогенида серебра. Некоторые проявители, имеющиеся в продаже, обра зуют зерна, подобные исходным (рис. 7.9,а).

<sup>1)</sup> Книга Кэрролла и др., с 266ff

Рис. 7.9.

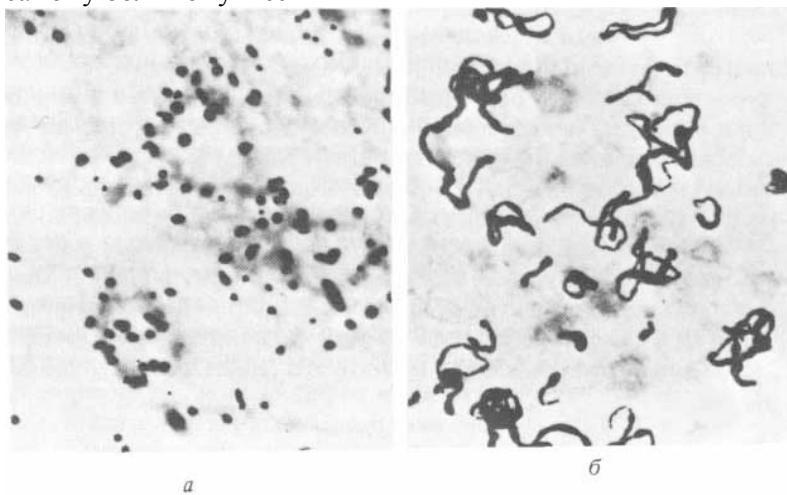


Компактное (а) и нитевидное (б) серебро, образующееся при проявлении зерен галогенида серебра. Фотографии Дж. Рида и Ф. Джада, Исследовательский центр Kodak.

Когда проявитель разрушает связь между серебром и галогеном, происходит прямое проявление зерен. Кроме того, пятно серебра действует как катализатор. В этом

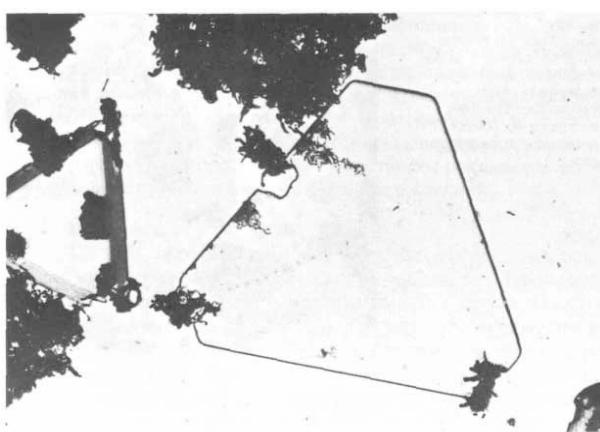
случае он может действовать как проводящий электрод для электронов, переходящих от проявителя к галогениду серебра, или как химический катализатор. Рассматривая в электронный микроскоп зерна, которые образованы проявителем, обладающим слабой растворяющей способностью по отношению к галогениду серебра, можно установить, что они имеют нитевидную форму (рис. 7.10). Некоторые проявители образуют зерна, которые при наблюдении их через оптический микроскоп кажутся пористыми. Если же их изучать с помощью электронного микроскопа, то оказывается, что они похожи на спутанные нити серебра, аналогичные изображенным на рис. 7.10, б.

На рис. 7.11 показаны зерна в процессе проявления. Черная губчатая масса, прикрепленная к самому большому шести-



**Рис. 7.10.**

Образование зерен серебра на начальной (а) и конечной (б) стадиях проявления проявителем на основе метола и аскорбиновой кислоты. Из книги B. Carroll, G. Higgins, T. James, *Introduction to Photographic Theory*, New York: John Wiley, © 1980.



**Рис. 7.11.**

Электронно-микроскопический снимок, показывающий частичное проявление зерна галогенида серебра. Фото R. Flint, Исследовательский центр Kodak.

гранному кристаллу, представляет собой проявленное серебро. Прозрачная часть кристалла является галогенидом серебра, а вытравленное углубление на верхней левой части кристалла может быть местом, откуда вышел галогенид серебра для образования губчатого серебра. Можно предположить, что точка прикрепления серебряной массы к галогениду серебра указывает положение исходного серебряного пятна скрытого

изображения. Образование плотного или пористого зерна (рис. 7.9) зависит главным образом от относительных скоростей растворения галогенида серебра и переноса электронов проявителем к галогениду серебра. Вероятно, плотные зерна образуются при преобладании действия растворителя, а губчатые — при преобладании переноса электронов.

В процессе восстановления галогенида серебра проявитель окисляется и затем взаимодействует с сульфитными соединениями. Освобожденные в процессе проявления галогены обычно взаимодействуют с ионами щелочных металлов, образуя растворимые соединения галогенидов щелочных металлов (например, бромид натрия). Ионы щелочных металлов присутствуют в проявителе в результате добавок щелочных ускорителей либо солей, образующихся в проявителе. Скорость проявления зависит от проявителя, эмульсии, температуры рабочего раствора и перемешивания проявителя. Подбор проявителя важен, поскольку одни проявители воздействуют на галогениды серебра быстрее, чем другие, а некоторые обладают более длительной

способностью проявления. К характеристикам эмульсии, влияющим на скорость проявления, относится толщина слоя эмульсии, ее диффузионные характеристики, распределение зерен галогенида серебра по размерам, распределение зерен в эмульсии.

Основным фактором, влияющим на скорость прядения-

ния, является температура, поскольку при ее повышении процесс диффузии проявителя через желатину, а также химические реакции (в данном случае проявление) протекают быстрее. Так как проявление обычно происходит в самих экспонированных зернах галогенида серебра или около них, вблизи зерна накапливаются побочные продукты проявления, которые часто препятствуют процессу. Накопление побочных продуктов отражается на составе проявителя в соседних областях эмульсии. Перемешивание проявителя помогает восстанавливать его однородность и способствует более быстрому и равномерному проявлению. К счастью, изготовители<sup>1</sup>) проявителей снабжают последние таблицами, номограммами и калькуляторами, которые позволяют определить оптимальное соотношение четырех факторов для достижения наилучшего проявления.

Некоторые проявители (например смесь метола и гидрохинона) обладают большей активностью проявления по сравнению с активностью каждого из проявляющих веществ в отдельности. Такие (так называемые супераддитивные) проявители представляют собой особую комбинацию проявителей быстрого и медленного действия. Можно предположить, что медленный проявитель дополняет быстрый на локальном участке, где происходит проявление.

Основные факторы, определяющие размер зерна серебра в проявленной эмульсии, — размер зерен галогенида серебра и их распределение в эмульсии, определяемое стадиями осаждения и созревания в процессе производства. Однако размер зерна может измениться в процессе проявления. Основные факторы, влияющие на изменение размера зерна в процессе проявления, — полная скорость проявления, действие растворителя проявителя на зерна галогенида серебра и относительные скорости физического проявления в растворе и прямого проявления. Если часть зерен растворена или самим проявляющим веществом, или добавкой в проявителе, такой, как, например, сульфит, и скорость физического проявления в растворе невелика, то размеры зерна могут быть уменьшены.

Проявитель Kodak D-76, по-видимому, действует именно таким способом, поскольку проявляющие вещества не растворяют заметно зерна и действуют относительно медленно и проявитель содержит сульфит натрия, который является слабым растворителем галогенидов серебра. С другой стороны, если большая часть зерен растворена, а скорость физического проявления в растворе высокая, то размеры зерна на самом деле могут увеличиться, поскольку проявитель может частично растворить неэкспонированные зерна и физическое проявление в растворе может привести к тому, что часть этого серебра будет осаждаться на ближайшие экспонированные проявленные зерна.

<sup>1</sup> Kodak Master Darkroom Guide, Third Edition, Rochester, N. Y.: Eastman Kodak Co., 1969.

Зернистый характер проявленной пленки или отпечатка обычно вызывается группами зерен, а не отдельными зернами, поскольку невооруженным глазом редко удается рассмотреть отдельные зерна. Возможность образования групп зерен определяется главным образом производственным процессом. Однако на размер проявленных групп, так же как и на размер индивидуальных зерен, может влиять проявитель. Следовательно, зернистый характер пленки или отпечатка может быть следствием процесса проявления.

### Обработка после проявления

После того как пленка или бумага проявлены, их часто помещают в слабокислый раствор (обычно 2%-ной уксусной кислоты), называемый *стоп-ванной*. Уменьшение pH приводит к немедленной остановке проявления. Стоп-ванна может содержать бисульфитные соединения, которые удаляют окисленное проявляющее вещество и таким образом предотвращают пятнистое окрашивание эмульсии. На этой стадии процесса эмульсия содержит серебро и непроявленные галогениды серебра. Если галогениды серебра не удалить, то они будут чернеть при экспонировании на свету. Хотя процесс проявления зависит от химии водных растворов, галогениды серебра, к счастью, практически нерастворимы в воде. Однако, для того чтобы удалить галогениды серебра из эмульсии, их надо превратить в соединения, растворимые в воде. Поэтому пленку или бумагу помещают в фиксирующую ванну (фиксаж), содержащую химикалии, превращающие галогениды серебра в растворимые соединения, которые могут быть затем вымыты из эмульсии. Наиболее употребительным фиксирующим веществом является тиосульфат натрия  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , называемый гипосульфитом. Галогенид серебра реагирует с гипосульфитом, образуя растворимый в воде сульфат серебра. Хлорид серебра реагирует с гипосульфитом наиболее быстро, а иодид —

медленнее. Присутствие иодида серебра фактически ингибитирует реакцию остальных галогенидов с фиксажем.

Время фиксирования зависит от типа эмульсии, вида и состояния фиксажа, температуры и эффективности перемешивания. Изготовители фотопленок и химических реагентов печатают таблицы, указывающие соответствующие времена фиксирования для различных комбинаций фиксажей и эмульсий. Однако при работе в открытой кювете, когда можно наблюдать за пленкой, легко определить время, в течение которого неэкспонированная часть эмульсии становится прозрачной. Время, необходимое для осуществления этого процесса, называется *временем осветления*. Если эмульсия фиксируется в течение времени, вдвое превосходящего время осветления, то фиксирование можно считать практически завершенным. Скорость фиксирования можно увеличить добавлением к раствору гипосульфита хлорида аммония; такая комбинация называется *быстрым фиксажом*, хотя другие фиксажи также могут обозначаться как быстрые. Некоторые фиксирующие ванны, называемые кислыми фиксажами, содержат калиевые квасцы, приводящие к кислотной реакции растворов<sup>1)</sup>. Такие ванны можно применять без стоп-ванны, поэтому они используются многими фотографами благодаря удобству работы с ними. Кислый фиксаж имеет то преимущество, что он нейтрализует использованный проявитель, который не может быть удален в случае стоп-ванны. Кроме того, калиевые квасцы — дубящее вещество, уменьшающее чувствительность размягченной желатины к механическим повреждениям в течение обработки. Кислые фиксажи менее стабильны по сравнению с обычными растворами гипосульфита, поэтому к ним при приготовлении добавляют сульфиты, которые действуют как средства, предохраняющие раствор от разложения.

Для удаления продуктов проявления и фиксирования пленка или бумага должны промываться в больших количествах воды или в проточной воде: остатки использованного проявителя образуют пятна на отпечатке, а гипосульфит через длительный период времени изменяется, приводя к обесцвечиванию отпечатка.

Очень трудно удалить остаточные следы гипосульфита из фотобумаги лишь промыванием водой, так как тиосульфат-ион имеет тенденцию прочно соединяться с основой фотобумаги. В тех случаях, когда готовят архивные фотоснимки, после промывки применяют разрушители гипосульфита. Раствор перекиси водорода с аммиаком действует как нейтрализатор остатков гипосульфита, превращая тиосульфатные соединения в сульфатные. Бромид калия добавляют к нейтрализатору для устранения побочных продуктов фиксирования.

Подложка фотобумаги многих типов покрывается (ламинируется) полимерными пленками, которые фактически непроницаемы для воды. Полиэтиленированная фотобумага промывается почти так же быстро, как и пленка, и значительно быстрее, чем обычная фотобумага (без полиэтиленового покрытия основы).

Наконец, отпечаток или пленку надо высушить. Полиэтиленированная бумага или пленка сушатся на воздухе (с помощью конвекции). Часто, чтобы ускорить процесс сушки, эмульсию обдувают нагретым воздухом. Обычные типы фотобумаг могут высушиваться на воздухе в контакте с фильтровальной бумагой или на нагретой металлической пластине либо барабане. Глянцевые сорта фотобумаги обычно дополнительно «глянцируют», накатывая на зеркально-гладкую поверхность.

~> Кислые фиксажи содержат обязательно и какую-нибудь слабую кислоту (уксусная, борная и т. п.) или кислую соль (метабисульфат калия или натрия, бисульфат натрия). Именно эти соединения обеспечивают нужную кислотность раствора. Добавление квасцов служит обычно для другой цели — дополнительного дубления слоя. Такие фиксажи называются дубящими и кислыми дубящими. — Прим. ред.

Этот процесс осуществляется высушиванием отпечатка, прикатанного эмульсией к нагретой хромированной металлической поверхности на плоском или барабанном глянцевателе.

Ламинированную бумагу не следует сушить на барабане или на пластине, поскольку под воздействием тепла полимер может расплавиться.

### Стабилизация

Процесс *стабилизации* является одностадийным полусухим процессом, заменяющим мокрое фиксирование и процесс промывки, что дает возможность получить законченный отпечаток за более короткое время. Это предоставляет значительное преимущество при копировании документов или подготовке фотоматериалов для газеты.

В этом процессе галогениды серебра покрываются соединениями, нечувствительными к свету. Такие соединения обычно светонепроницаемы, имеют белый цвет и поэтому могут быть использованы для стабилизации фотобумаги; однако они непригодны для фотопленок. Эти соединения все-таки не полностью светонепроницаемы, и поэтому фотоотпечатки темнеют со временем. В одной разновидности процессов галогениды серебра превращаются в растворимые в воде соединения, которые могут вымываться, приводя к более долговечной копии. При этом для

стабилизации отпечатков используется гипосульфит. Если комплексы тиосульфата серебра, являющиеся продуктами фиксирования, остаются в эмульсии при высокой концентрации, тенденция этих комплексов к распаду уменьшается по мере того, как происходит постепенное окрашивание. Отфиксированный, но непромытый фотоотпечаток более стабилен по сравнению с плохо промытым отпечатком. Вторую разновидность стабилизаторов образуют нерастворимые соединения, которые не могут быть вымыты позже, чтобы образовать более долговечный отпечаток.

При таком способе обработки обычно используется полиэтиленированная фотобумага для уменьшения поглощения подложкой воды и продуктов проявления и фиксирования. Это усовершенствование позволяет ускорить обработку и улучшить конечный результат. Хотя метод стабилизации используется и сейчас, он не выдерживает усиливающейся конкуренции со стороны усовершенствованной ксерографии для копирования документов и непрерывных процессов печати для других видов скоростных копировальных работ.

### Метод обращения

Обычно изображение, созданное на пленке, является негативом по отношению к объекту фотографирования. Светлые участки предмета создаются на пленке темные детали, и наоборот. Можно получить на пленке прямое позитивное изображение, тона которого прямо соответствуют покернениям пленки. Такой вид обработки пленки используется для любительских кинофильмов и цветных диапозитивов с целью получения прямых позитивных изображений. После того как скрытое изображение проявлено, в *процессе обращения* используется стадия *отбеливания* (рис. 7.12) для того, чтобы превратить проявленное серебро в растворимые в воде соединения. На первый взгляд кажется, что для получения прямого позитива надо только воспользоваться способом обращения обычной фотопленки. Однако отметим, что, когда обычная пленка экспонируется и обрабатывается (рис. 7.12), образуется очень малоплотный «тонкий» негатив. Если далее пленка подвергается процессу обращения, первоначально незэкспонированные галогениды серебра на второй стадии проявления будут восстановлены до серебра (рис. 7.13) и светлые участки на пленке будут малопрозрачными.

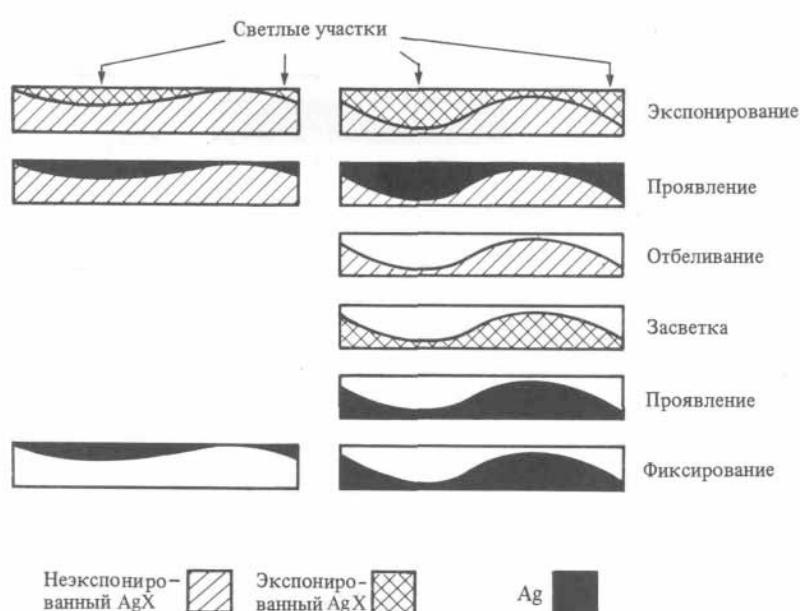


Рис. 7.12.  
Схемы обычного и обращаемого  
процессов проявления.

По этой причине обращаемые пленки изготавливаются менее толстыми по сравнению с большинством негативных пленок и к проявителю добавляются растворители галогенида серебра, чтобы растворить некоторые из более мелких зерен. Этот растворитель в первом проявителе растворяет наиболее мелкие непроявленные зерна галогенида серебра на светлых участках; присутствие таких зерен может вызвать вуаль при втором проявлении. Обращаемые пленки должны быть более однородными по

толщине по сравнению с используемыми негативными пленками, так как неоднородности по толщине вызывают изменения оптической плотности прямого позитива помимо таких же изменений вследствие экспозиции пленки.



Рис. 7.13.  
Вид обычной и обращаемой пленок после проявления

методом обращения.

Правильный выбор экспозиции и времени проявления очень важен при работе с обращаемыми материалами, и любое отклонение от оптимальной экспозиции надо скомпенсировать соответствующим изменением при проявлении. Если пленка недоэкспонирована, первое проявление должно быть увеличено, с тем чтобы удалить соответственно больше галогенида серебра, особенно на светлых участках. Получающийся прямой позитив будет оптически менее плотным и, следовательно, более приемлемым, чем когда он подвергается обычному процессу проявления.

#### Диффузионно-фотографический процесс

Сегодня наиболее общий черно-белый *диффузионный процесс* представляет собой процесс фирмы «Поляроид», разработанный Э. Лэндом. Мгновенные цветные процессы фирм Kodak и Polaroid Corporations также представляют собой диффузионно-фотографические процессы.

В черно-белом диффузионном процессе эмульсия, обычно нанесенная на бумажную подложку, экспонируется в фотоаппарате. После экспозиции этот донорный слой (негатив) (рис. 7.14) приводится в тесный контакт с белым приемным слоем позитивного материала, на поверхности которого имеется много коллоидно-металлических или металлоксульфидных центров проявления. В процессе получения изображения проявляющая паста размазывается между донорным и приемным слоями. На рис. 7.15, и показано положение фотоматериалов в начале процесса проявления. Проявитель немедленно начинает проявлять экспонированный галогенид серебра в донорном слое (рис. 7.15,6), и одновременно растворитель начинает растворять неэкспонированный галогенид серебра. Если скорости растворения и проявления правильно сбалансированы, то проявитель действует на экспонированный галогенид серебра существенно раньше, чем он может раствориться. Следовательно, на затененных участках снимка большая часть галогенида серебра диффундирует к приемному слою, чем на светлых участках (рис. 7.15,6).



Рис. 7.14.  
Схема образования изображения с помощью диффузионного процесса Polaroid (одностадийный процесс).

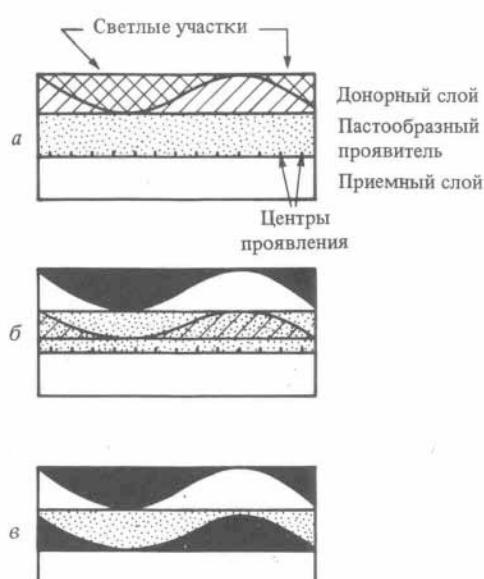


Рис. 7.15.  
Схема диффузионного процесса проявления

Если проявитель недостаточно активен, проявляется малое количество диффундирующего галогенида серебра. Когда диффундирующий галогенид серебра достигает приемного слоя и приходит в контакт с центрами проявления, проявитель инициирует проявление на приемном слое, в результате чего образуется позитив. На донорном слое образуется негатив. Приемный слой может содержать до  $10^{13}$  центров проявления на 1 см<sup>2</sup>. Размеры проявленных зерен в позитиве значительно меньше, чем в негативе (рис. 7.16). Однако, поскольку распределение зерен в позитиве определяется зернами негатива, группирующееся множество мелких зерен в позитиве приводит к образованию квазизернистости со значительно большими размерами.

|                             |  |                             |
|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Незэкспони-<br>рованный AgX |  | Ag                          |
| Экспониро-<br>ванный AgX    |  | Пастообразный<br>проявитель |

Диаметр зерна в случае обычной фотобумаги составляет около 0,01 мкм, а число зерен на 1 см<sup>2</sup> площади бумаги приблизительно равно числу центров проявления на 1 см<sup>2</sup> приемного слоя для диффузионного процесса. Наблюдаемая зернистость в обычной фотопечати зависит от размера зерен в негативе точно так же, как и в случае диффузионного позитива.

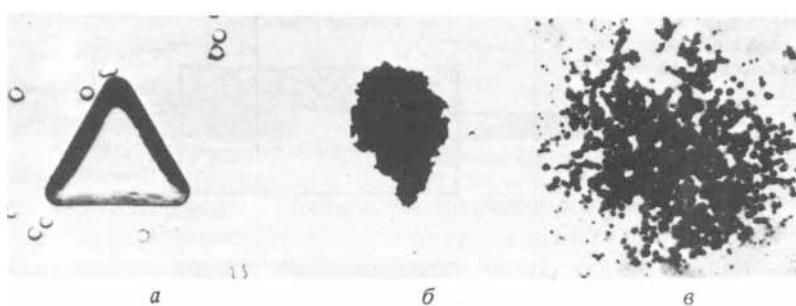


Рис. 7.16.

Непроявленное (а) и проявленное (б) зерна негатива, а также проявленные зерна позитивного изображения (в) в диффузионном процессе проявления. Copyright © Society of Photographic Scientists and Engineers. Фотография предоставлена д-ром Лэн-дом.

Успех диффузионного процесса зависит от правильного подбора скоростей процессов растворения,

диффузии и проявления в донорном слое проявляющей пасты и в приемном слое. Правильный выбор диспергирующей среды донорного слоя может увеличить скорость проявления экспонированного галогенида серебра. Относительно высокая плотность центров проявления приводит к увеличению скорости проявления неэкспонированных зерен в приемном слое.

### Упражнения

- Сравните структуру используемых фотопленок и фотобумаг общего назначения.
- Рассмотрите соединения галогенидов серебра в обычно используемых фотопленках и фотобумагах. Какие рациональные соотношения между AgCl, AgBr и AgI используются в фотобумаге и фотопленке?
- Перечислите основные компоненты фотоэмulsionи и сформулируйте назначение каждого из них.
- Опишите экспозицию и обработку фотопленки. Объясните назначение каждой стадии.
- Качественно рассмотрите теорию Гарни и Мотта образования скрытого изображения.
- Опишите состав типичного проявителя и сформулируйте функции каждого компонента.
- Сравните физическое проявление в растворе и прямое проявление. Опишите эти процессы и рассмотрите образование зерен серебра в обоих случаях.
- Опишите мелкозернистые проявители и порядок их действия. Какова относительная роль прямого проявления и физического проявления в растворе мелкозернистого проявителя?
- Чем отличается процесс стабилизации от обычного процесса фиксирования? При каких условиях стабилизированный фотоотпечаток можно фиксировать?

## Глава 8. Сенситометрия

### Воспроизведение тонов

После того как выяснены основные черты механизма регистрации света галогенидами серебра, приступим к рассмотрению задачи о правильном воспроизведении сюжета на фотопленке. В этой главе рассматриваются основы *сенситометрии*, которые в следующей главе применяются к задаче получения фотографического изображения. Обычно фотографируемый объект освещается несколькими источниками света (редко одним), которые могут давать как равномерное, так и неравномерное освещение. Сами объекты отражают свет по-разному: некоторые способны отражать много света (например, белые поверхности), в то время как другие практически не отражают свет (например, черный бархат). Не всегда отраженный от предмета свет будет обладать таким же цветом, что и падающий. Однако, предполагая, что фотопленка является панхроматической, т. е. чувствительной к общему количеству отраженного предметом света, этот эффект можно не учитывать (цветные фотопленки рассматриваются позже).

Почернение проявленной фотопленки будет тем значительнее, чем больше света попадает на нее. Изображение, регистрируемое фотопленкой, характеризуется некоторым распределением серых тонов, которое затем воспроизводится на фотобумаге, причем самые светлые участки негатива приводят к образованию самых темных тонов на отпечатке. Количество света, отраженного данным участком объекта, называется яркостью. В фотографии яркость измеряется в канделях на квадратный метр. Приборы, измеряющие отраженный свет, в том числе и фотоэкспонометры, измеряют яркость или какую-либо другую величину, пропорциональную ей. Контраст объекта представляет собой отношение яркостей самой светлой и самой темной его частей и иногда называется просто отношением света и тени. Фотографы часто используют понятие «тон» для

описания не только градации серого цвета на фотопленке или фотобумаге, но также яркостей участков объекта.

### Интервал яркостей объекта съемки

Открытый пейзаж в яркий солнечный день, как правило, получает непосредственно от солнца 90% света, а в средний солнечный день — около 80%.

<sup>11</sup> Учение об измерении фотографических характеристик светочувствительных слоев — *Прим. перев.*

Оставшееся количество — это солнечный свет, отраженный от окружающих объектов и облаков, а также рассеянный частицами пыли, находящимися в воздухе. Максимальное отношение яркостей вне помещения в солнечный день достигает 1000/1. Если не учитывать световые блики (т. е. свет, отраженный от стекла или блестящего металла) и совершенно черный тон (например, открытый дверной проем в темную комнату), то контраст будет около 160/1. Для сравнения отношение яркостей на пляже в пасмурный день составляет 10/1.

**Регистрирующая способность фотобумаги** Контраст между самым светлым и самым темным тоном<sup>1</sup> на глянцевой бумаге составляет приблизительно 70/1. Полуматовая и матовая бумаги обладают несколько меньшим контрастом. Следовательно, большинство объектов не может быть воспроизведено на фотобумаге такими, какими они видимы глазом. Поэтому тональный диапазон должен быть сжат. С другой стороны, сцена на пляже в пасмурный день может быть воспроизведена такой, какой она видима глазом. Обычно область тонов в таком случае может быть расширена для улучшения качества снимка. Степень сжатия (или растяжения) тонального диапазона в значительной мере определяет эмоциональное воздействие получаемого отпечатка. Если фотограф при фотографировании высококонтрастного объекта хочет получить максимально близкое к действительности воспроизведение тонов, то необходимо использовать несжатые тона средних серых градаций и сжатые света и тени. Эта ситуация представлена схематически на рис. 8.1, где каждый прямоугольник представляет один из тонов.

### Регистрирующая способность фотопленки

Фотоаппарат и фотопленка изменяют контраст изображения объекта в процессе фотографирования. Через неэкспонированную, а затем проявленную пленку проходит приблизительно в  $10^3$  раз больше света по сравнению с засвеченной и затем проявленной пленкой. Однако в дальнейшем будет показано, что наилучшие отпечатки могут быть получены, когда регистрирующая способность фотопленки используется не полностью.



Рис. 8.1.

Сжатие тонов сюжета среднего контраста.

<sup>1)</sup> В дальнейшем также будут употребляться общепринятые термины света и тени. — *Прим. перев.*

### Светорассеяние

В гл. 4 обсуждалась роль просветляющих покрытий

оптических деталей объектива для уменьшения отражения света от их поверхностей. Это отражение приводит не только к потере света в изображении, но также является причиной дополнительной засветки на освещенных участках — явление светорассеяния. Степень засветки зависит от качества просветляющих покрытий, контраста объекта и типа объектива. Старые непросветленные объективы, а также объективы с переменным фокусным расстоянием, используемые вне помещения при малых значениях относительного отверстия в солнечный день, могут рассеивать до 10% света. Это означает, что до 10% света теряется в данной части изображения по сравнению с той же частью сюжета. С другой стороны, объективы с многослойным просветляющим покрытием со средним фокусным расстоянием дают не более 1,5% светорассеяния. Большинство объективов с однослойным просветлением рассеивает примерно 1,5—4,5% при фотографировании в контрастных условиях освещения. При съемке интерьеров или в студийных условиях светорассеяние будет малым для любых объективов<sup>11</sup>. Светорассеяние всегда приводит к уменьшению контраста, но степень этого уменьшения зависит еще и от конкретной ситуации.

**Пример 8.1.** Пусть уличная сценка фотографируется 35-мм фотокамерой, имеющей объектив с фокусным расстоянием 55 мм. Светорассеяние этого объектива составляет приблизительно 3%.

Определить отношение яркостей изображения, если отношение яркостей объекта равно 160/1.

Предположить, что 20% света, рассеянного от наиболее яркого участка объекта, попадает в самый темный участок изображения.

Количество потерянного света на светлом участке составляет в произвольных единицах  $0,03 \cdot 160 = 4,8 \sim 5$ , т. е. яркость этого участка уменьшается до 155. Яркость тени вследствие добавочного света от светлого участка увеличивается приблизительно на  $5 \cdot V_5 = 1$  и уменьшается приблизительно на 0,03 из-за рассеяния света в этой части изображения, так что яркость тени составляет 1,97. Отношение

яркостей уменьшается до  $155/1,97 \sim 80/1$ . Таким образом, объект, охватывающий семь ступеней шкалы яркости ( $2^7 = 128$ ,  $2^8 = 256$ ), в результате использования объектива создает изображение, соответствующее чуть более шести ступеней яркости ( $2^6 = 64$ ).

### Экспозиция

Прежде чем обсуждать вопрос воспроизведения яркости сюжета в виде различных тонов на фотобумаге, рассмотрим связь между светом и вызываемым им почернением пленки. Как было показано выше, экспозиция  $H$  равна произведению освещенности  $E$  на время экспозиции  $t$ :

$$H=E \cdot t. \quad (8.1)$$

" Kodak Professional Black-and-White Films, Rochester, N. Y.: Eastman Kodak Co., 1976.

С точки зрения закона взаимозаместимости, который выражает данная формула, представляет интерес усредненная экспозиция пленки. В этом разделе мы рассматриваем экспозицию, соответствующую различным участкам сцены. Особую роль играет освещенность  $E$  пленки в ее различных точках в зависимости от освещенности объекта. В фотографии освещенность обычно измеряется в люксах (лк), время — в секундах и экспозиция — в единицах лк-с. Время экспозиции для любых участков снимка будет одинаковым. Освещенность, однако, различно для разных участков объекта: затененные участки характеризуются низкой освещенностью, светлые — высокой освещенностью. Этот разброс освещенности и является причиной существования соответствующего диапазона экспозиций на фотопленке  $H$ .

### Логарифмическая природа зрительного восприятия

В конечном счете относительная плотность почернения различных участков отпечатка оценивается глазом. Поэтому разумно определять степень почернения отпечатка и негатива способом, аналогичным восприятию глазом различных уровней освещенности.

Рассмотрим экспонометр с линейной шкалой чувствительности. Это значит, что если яркость удваивается, то показания прибора также удваиваются. Представим себе ситуацию, в которой глаз (или мозг) воспринимает удвоение освещенности; экспонометр же покажет увеличение освещенности в квадрате. Иначе говоря, субъективная реакция глаза к уровню освещенности описывается логарифмическим законом. Экспозиция, определяемая согласно выражению (8.1), изменяется линейно, и экспонометры также часто имеют линейную шкалу отсчета.

**Пример 8.2.** Необходимо сфотографировать участок Каменной стены, освещенной рассеянным солнечным светом. При визуальной оценке объекта фотограф решил, что светлые участки имеют в два раза большую яркость, чем затемненные. Используя экспонометр, он установил, что показание прибора, соответствующее затемненным участкам, составляет 10 отн. ед. Каковы будут показания прибора для светлых участков стены, если глаз правильно оценил ситуацию?

Поскольку субъективное зрительное восприятие соответствует удвоенному значению освещенности, соответствующее показание прибора будет составлять  $10^2$  отн. ед.

Взаимосвязь между показанием экспонометра и реакцией глаза, продемонстрированная в примере 8.2, может быть обобщена и представлена для нескольких степеней числа 10 (табл. 8. L).

Напомним, что при рассмотрении взаимосвязи диафрагменного числа с временем экспонирования использовалось понятие ступени шкалы диафрагмы и отмечалось изменение экспозиции в два раза при изменении диафрагмы на одну ступень.

### Таблица 8.1. Взаимосвязь между показаниями экспонометра и реакцией глаза (пример 8.2)

Показание

экспоно-

|                     |    |     |      |        |         |           |
|---------------------|----|-----|------|--------|---------|-----------|
| метра<br>(линейное) | 10 | 100 | 1000 | 10 000 | 100 000 | 1 000 000 |
|---------------------|----|-----|------|--------|---------|-----------|

1 Субъектив-

ная реак-

ция глаза

|                          |      |   |   |
|--------------------------|------|---|---|
| (логарифмичес-<br>кая) 0 | 1234 | 5 | 6 |
|--------------------------|------|---|---|

Коэффициент 2 в экспозиции измерялся с помощью экспонометра, обладающего такой же

линейной шкалой, как обсуждавшаяся выше. Если показание экспонометра изменяется в два раза, то визуально фиксируемое изменение составляет 0,3 раза. Другими словами, если показание прибора изменяется от 10 до 20, то глазом отмечено изменение от 1 до 1,3. Изменение показания экспонометра от 1 до 2 соответствует визуально фиксируемому изменению от 0 до 0,3 и т.д. Изменение освещенности на одну ступень всегда означает логарифмическое изменение 0,3. Отметим, что экспонометры, используемые в фотографии, обычно, конструируют таким образом, чтобы их показания были совместимы со зрительным восприятием. Подробнее эти вопросы обсуждаются в гл. 9.

### Оптическая плотность

Для количественного определения степени почернения негатива необходимо ввести некую физическую величину, которая возрастала бы с увеличением почернения и соответствовала бы восприятию человеческого глаза. Эта величина называется оптической плотностью и равна  $D = \lg(I/T)$ , (8.2) где  $T$  — пропускание. Пропускание может быть определено экспериментально. Представим, что равномерно освещенную белую стену фотографируют, используя пять различных экспозиций, каждая из которых увеличивается на одну ступень шкалы диафрагм по сравнению с предыдущей. Пленка проявляется стандартным способом, и полученные негативы разрезаются на части. Каждый негатив дает однородный серый тон от самого светлого до самого темного. Для измерения количества света, поглощенного каждым кадром фотопленки, применяется денситометр, схема действия которого представлена на рис. 8.2.

Прибор состоит из стабилизированного источника света, коллиматора (для формирования строго параллельного пучка света), держателя пленки и фотометра (для измерения яркости проходящего света). Сначала измеряют яркость источника в отсутствие пленки. Обозначим эту яркость через  $I_0$ . Яркости света, измеряемые фотометром при наличии каждого из пяти кадров фотопленки, будут соответственно равны  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ .

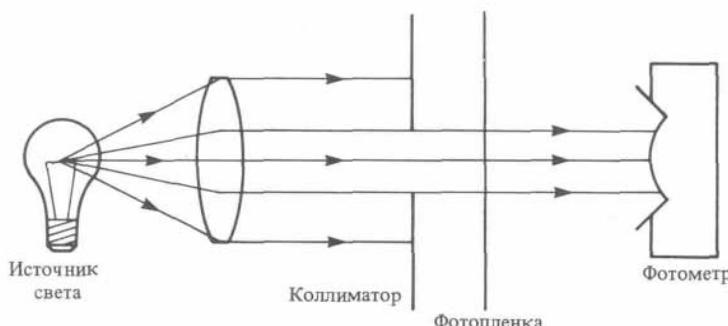


Рис. 8.2.  
Схема действия денситометра при измерении пропускания фотопленки.

Пропускание  $T$  в каждом случае представляет собой долю света, прошедшего сквозь пленку, и равно  $|I_1|/I_0, |I_2|/I_0, |I_3|/I_0 > W |I_5|/I_0$ . Если теперь вычислить обратные величины и затем найти их логарифмы, то получим оптическую плотность кадра фотопленки в каждом случае.

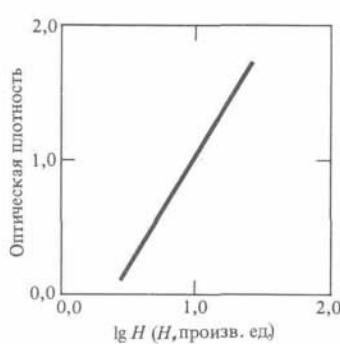
**Пример 8.3.** Чтобы проиллюстрировать предыдущие рассуждения, предположим, что все пять негативов сделаны с выдержкой 1/125 с и последовательными значениями диафрагменных чисел 16, 11, 8, 5,6 и 4. Предположим, что яркость светового источника  $I_0$  в отсутствие пленки соответствует 32 отн. ед. и что  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  составляют соответственно 16, 8, 4, 2 и 1 отн. ед. Определим оптические плотности фотопленки для каждого случая. Рассмотрим первый кадр, для которого  $|x| = 16$ . Так как  $I_0 = 32$ , имеем  $T_1 = 16/32 = 0,5$  и  $\lg T = 2$ ;  $\lg 2 = 0,3$  и, следовательно,  $D = 0,3$ . Остальные результаты приведены в табл. 8.2. Экспозиции обозначены соответствующими диафрагменными числами, а величины пропускания округлены для случаев 4 и 5. Значения  $D$  могут быть получены с помощью таблицы десятичных логарифмов или с помощью калькулятора, но если учесть, что  $\lg 2 = 0,3$  и при удвоивании числа его логарифм увеличивается на 0,3, то значения  $D$  могут быть легко найдены.

Полезно рассмотреть соотношение между плотностью почернения фотопленки и экспозицией. Из табл. 8.2 видна взаимосвязь между этими параметрами для некоего гипотетического случая.

Отметим, что приведенный пример искусственный, а экспозиции относительны; однако график, устанавливающий связь экспозиций с плотностью почернения, может быть построен (рис. 8.3). На оси ординат отложены оптические плотности, взятые из табл. 8.2. На оси абсцисс приведены

логарифмы экспозиции, выраженной в относительных единицах. Можно убедиться, что смежные экспозиции отличаются друг от друга в два раза и что логарифмы экспозиций увеличиваются на 0,3 для каждой последующей экспозиции. Начало оси абсцисс выбрано произвольно.

Рис. 8.3.



Зависимость оптической плотности фотопленки от логарифма экспозиции (пример 8.3).

**Таблица 8.2. Результаты, полученные в примере 8.3**

Диафраг-

Экспо- менное

| Экспозиция | число | /  | $T = I/I_0$ | $\log T$ | $D = \log(I/T)$ |
|------------|-------|----|-------------|----------|-----------------|
| 1          | 16    | 16 | 0,5         | 2        | 0,3             |
| 2          | 11    | 8  | 0,25        | 4        | 0,6             |
| 3          | 8     | 4  | 0,0125      | 8        | 0,9             |
| 4          | 5,6   | 2  | 0,0062      | 16       | 1,2             |
| 5          | 4     | 1  | 0,0031      | 32       | 1,5             |

**Характеристическая кривая**

В 1880 г. Ф. Хартер и В. Дриффильд проводили эксперименты с фотографическими эмульсиями, которые по существу аналогичны рассмотренному выше примеру. Эти эксперименты выявили взаимосвязь между экспозицией и плотностью почернения, которая в графическом изображении называется характеристической кривой. Пример такой кривой приведен на рис. 8.4.

Участок кривой от  $A$  до  $B$  называется начальным. На приведенном графике этот участок соответствует пленке с так называемой короткой областью недодержек, поскольку увеличение плотности происходит достаточно резко. В пленках с длинной областью недодержек изменения более плавные и излом иногда незаметен. Величина области недодержек в пленке определяется размерами зерен фотоэмulsionии: чем больше зерно, тем короче область недодержек.

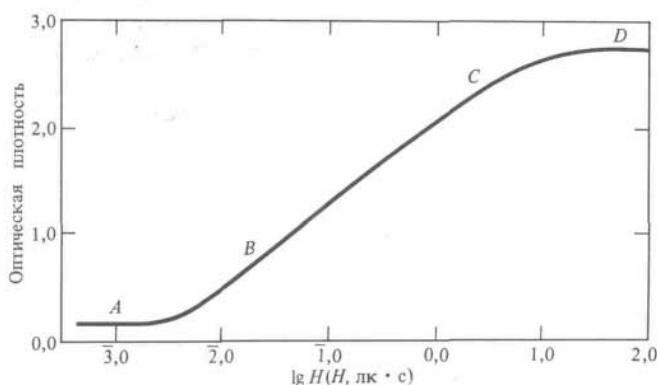


Рис. 8.4.  
Типичная характеристическая кривая фотопленки. Плотность почернения в области недодержек увеличивается очень медленно, поскольку в зерне должно быть собрано конечное число атомов серебра (гл. 7), чтобы сделать зерно способным к проявлению. Экспозиция на начальном участке характеристической кривой настолько мала, что трудно достичь порога чувствительности, пока тепловой эффект

не вызовет перераспределение серебра в зерне. Плотность почернения никогда не достигает нуля, поскольку подложка поглощает некоторое количество света и некоторые зерна в фотоэмульсии всегда способны к проявлению вследствие их сенсибилизации теплом и (или) фоновым излучением. Эти проявленные фоновые зерна называются вуалью, а минимальная плотность почернения фотопленки иногда называется *оптической плотностью основы и вуали*. Область  $B-C$  называется прямолинейным участком характеристической кривой<sup>1)</sup>). Здесь плотность приблизительно пропорциональна логарифму экспозиции. Намного меньше сжатие диапазона тональностей происходит в этой области по сравнению с начальной областью характеристической кривой. Может показаться, что линейный участок кривой более предпочтителен для использования при воспроизведении сюжета. Однако позже будет показано, что это необязательно.

Участок кривой  $C-D$  называется верхним или областью передержек. В этой области тона вновь сильно сжаты, и она редко используется в обычной черной-белой фотографии. Отсутствие пропорциональности в этой области объясняется тем, что большинство зерен уже поглотили свет и стали способными к проявлению при меньших экспозициях (только немногие оставшиеся зерна при поглощении добавочных фотонов становятся способными к проявлению.). В примере 8.1 было найдено, что обычный сюжет с отношением яркостей  $160/1$  соответствует тональному диапазону, превышающему семь ступеней. Так как число  $0,3$  по логарифмической шкале соответствует изменению экспозиции на одну ступень шкалы диафрагмы, то экспозиция фотопленки сюжета, у которого отношение яркостей составляет  $160/1$ , определена по логарифмической шкале приблизительно до  $7-0,3 = 2,1$ . При этом эффект светорассеяния в объективе не учитывается.

Оптическая плотность фотонегатива зависит не только от диапазона яркостей сюжета, но также от полной экспозиции и от способа проявления пленки. Оба этих эффекта проиллюстрированы на рис. 8.5. В гл. 7 было показано, что если время проявления увеличивается, то экспонированный негатив становится оптически более плотным. Следовательно, верхняя кривая на рис. 8.5 обусловлена более длительным проявлением по сравнению с нижней кривой. Увеличение экспозиции сдвигает экспозицию от  $H_s$  до  $H_L$ , при этом интервал экспозиций по оси абсцисс не изменяется.

<sup>1)</sup> Область  $B-C$  часто называют областью прямопропорционального воспроизведения или областью правильных экспозиций.  
— Прим. перев

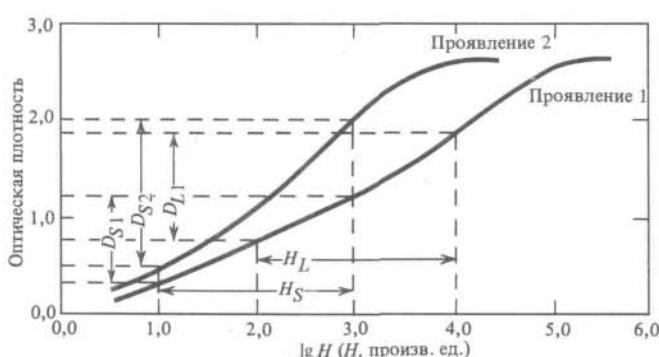


Рис. 8.5.  
Влияние условий проявления и экспонирования на оптические плотности негативов, полученных при фотографировании одной и той же сцены.

Оптические плотности будут смещаться к большим значениям, и интервал плотностей обычно изменяется. В нашем примере  $D_u$  больше, чем  $D_{S1}$ . Увеличение времени проявления увеличивает общую оптическую плотность пленки, а также интервал оптических плотностей ( $D_{S2}$  больше, чем  $D_{S1}$ ). Таким образом, для

получения лучших результатов необходимо решить следующие вопросы: 1) как экспонировать пленку, 2) каково время проявления, 3) какой применить проявитель, 4) какую выбрать температуру?

## Средний градиент, гамма и показатель контрастности

По существу для каждой фотопленки должно быть получено семейство характеристических кривых. Каждое такое семейство будет полным только в том случае, если для любой комбинации проявителя, времени и температуры известна характеристическая кривая. Чтобы семейство характеристических кривых было действительно полным, необходимо получить около 300 кривых для каждой пленки. Затем с их помощью можно предсказать диапазон оптических плотностей данного негатива в зависимости от условий экспонирования и проявления пленки.

Вместо этого строится всего несколько характеристических кривых, по которым находят определенные характеристики пленки, позволяющие определять оптимальные условия химико-фотографической обработки. Одной из основных характеристик является скорость, с которой меняется оптическая плотность в зависимости от экспозиции. Раньше эта характеристика определялась из наклона прямолинейного участка характеристической кривой и называлась гамма ( $\gamma$ )<sup>1</sup>. Для характеристической кривой, представленной на рис. 8.6, гамма есть

<sup>Ч</sup> В отечественной литературе эту характеристику принято называть коэффициентом контрастности, который равен тангенсу угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой к оси абсцисс. — Прим. перев.

$$\gamma = (D_2 - D_1) / (\lg H_2 - \lg H_1) \quad (83)$$

Поскольку большинство современных фотопленок не обладает ярко выраженным прямолинейным участком кривой, нахождение у довольно затруднительно. Чтобы получить наилучший отпечаток с негатива, необходимо использовать такую экспозицию, при которой затененные участки сюжета воспроизводятся в начальной области характеристической кривой. На самом деле правильная экспозиция в случае обычного сюжета выбирается так, чтобы различимые (и желательные) теневые детали создавали на негативе оптическую плотность приблизительно на 0,1 больше, чем у подложки и вуали. Обычный сюжет на логарифмической шкале экспозиций занимает приблизительно две единицы. Следовательно, лучшей характеристикой является тангенс угла наклона секущей длиной в две единицы  $\lg H$ , проходящей через точку кривой, оптическая плотность в которой на 0,1 больше ее значения для основы и вуали, и точку пересечения этой секущей с характеристической кривой. Этот параметр называется средним градиентом и обозначается  $S$ . Из рис. 8.6 имеем  $S = (D'_2 - D'_1) / (\lg H'_2 - \lg H'_1)$  (84).

Ilford<sup>11</sup> использует параметр, названный Gee Bar (G), который аналогичен среднему градиенту. Величина  $\lg Y$  определяется как и для среднего градиента, но  $\lg Y'_2 - \lg Y'_1$  полагается равным 1,5 и  $D'_2$  определяется путем нахождения оптической плотности на характеристической кривой, соответствующей новому значению  $\lg Y'_2$ . Параметр Gee Bar представляет собой наклон прямой линии, соединяющей эти точки на характеристической кривой. В литературе средний градиент и  $G$  иногда используются равноправно и их обозначения отличаются от принятых здесь.

Eastman<sup>2</sup> использует число, называемое показателем контрастности, нахождение которого довольно затруднительно и которое дает те же самые результаты, что и средний градиент при наклонах, меньших единицы (обычный случай).

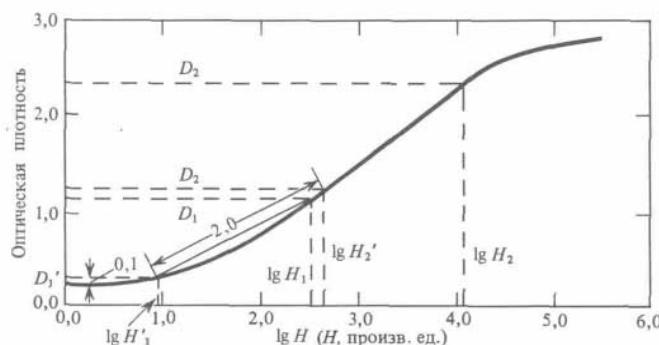


Рис. 8.6.

Определение величин  $\gamma$  и среднего градиента  
<sup>11</sup> H Asher, Photographic Principles & Practices, Garden City, N Y  
Amphoto, 197*i*, p 200 <sup>2</sup>> Kodak Professional Black-and-White Films, p 13

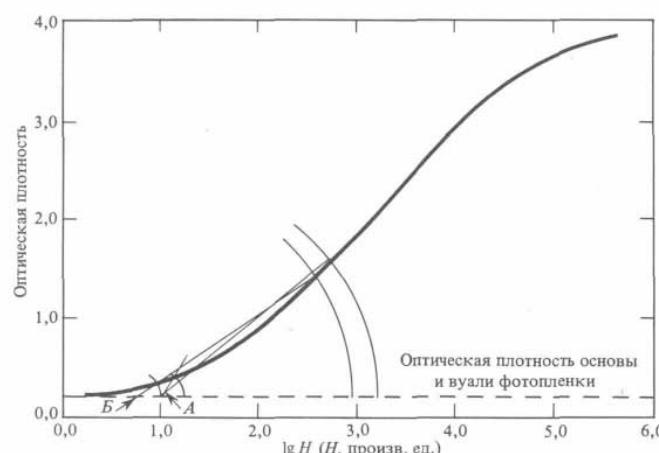


Рис. 8.7.

Определение показателя контрастности.

При определении показателя контрастности находят уровень оптической плотности, соответствующий основе и вуали для фотопленки, и проводят прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 8.7). Затем выбирают произвольную точку на этой прямой и проводят две дуги радиусами 0,2 и 2,2 единицы  $\lg H$ , пересекающих

характеристическую кривую (точка *A*). Затем проводят две секущие, проходящие через выбранную точку и точки пересечения дуг с характеристической кривой. Если полученные хорды не совпадают друг с другом, то выбирают новую точку на линии основа плюс вуаль и повторяют операцию до полного совпадения секущих (точка *B*). Наклон этих двух совпавших секущих и является показателем контрастности. На практике для расчетов используют специальные калькуляторы<sup>1</sup>. Простой калькулятор, изготовленный в домашних условиях, описан в руководстве фирмы Kodak<sup>2</sup>. На рис. 8.8 представлены типичные характеристические кривые для фотопленки Kodak Tri-X Pan при определенных временах проявления в проявителе Kodak D-76. Числа, обозначенные *C*/*I*, представляют собой соответствующие показатели контрастности.

**Пример 8.4.** Характеристическая кривая для фотопленки Panatomic X, проявленной в течение 6 мин в проявителе D-76, представлена на рис. 8.9. Найдем средний градиент *S* пленки, проявленной в указанных условиях, и сравним полученное значение с показателем контрастности (около 0,6).

Чтобы определить *S*, сначала найдем точку на характеристической кривой, находящуюся выше линии

«Оптическая плотность основы и вуали» на 0,1, и затем проведем дугу длиной

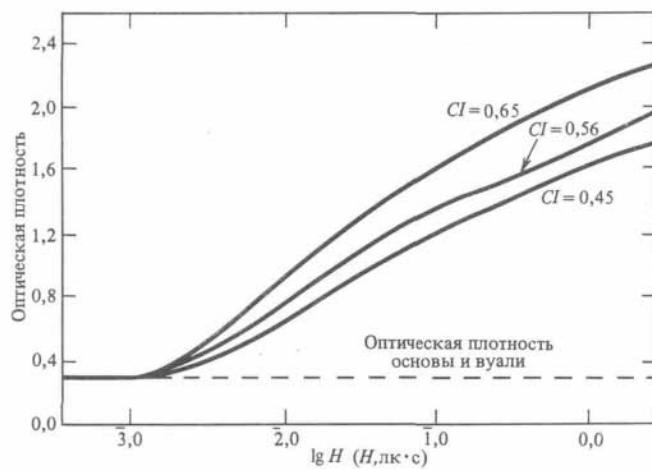
"H. N. Todd, R. D. Zakia, Photographic Sensitometry,

Hastings-on-Hudson,

N. Y.: Morgan and Morgan, 1969, p. 71ff > Kodak Professional Black-and-White Films, p. 13.

Рис. 8.8.

Характеристические кривые черно-белой фотопленки.



совпадает с указанным выше значением показателя контрастности. Отметим, что экспозиционная область (1,75) несколько больше, чем принятое значение 1,5 в случае G.

Из рис. 8.10 видно, как изменяется показатель контрастности фотопленки Kodak Tri-X Pan в зависимости от времени проявления для различных типов проявителей. Представленные кривые соответствуют стандартной партии пленок.

Поскольку форма характеристической кривой зависит также от температуры проявления, при температурах, отличных от стандартной (20°C), необходимо применять корректирующие таблицы. Если температура увеличивается, время проявления уменьшается, и наоборот. Кроме того, на форму характеристической кривой влияют и другие факторы, такие, как размер бачка, используемого для проявления, способ перемешивания, качество изготовления данной партии фотопленок. Изготовители пленок предоставляют в распоряжение потребителя различные таблицы и (или) калькуляторы для определения правильного времени проявления для различных комбинаций этих параметров<sup>1</sup>.

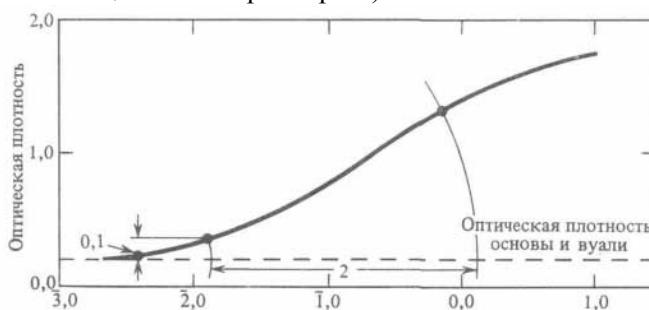


Рис. 8.9.

Определение величины *S* для пленки Kodak Tri-X Pan по характеристической кривой.

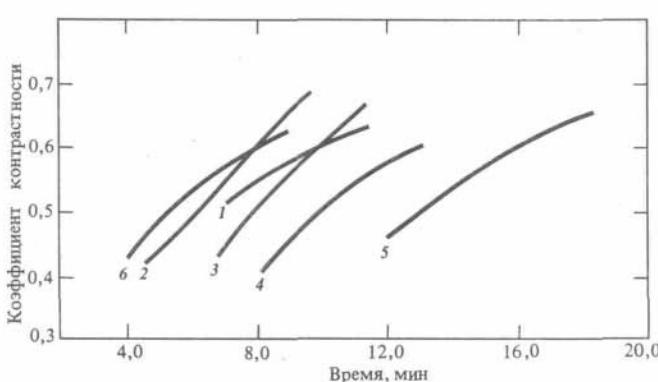


Рис. 8.10.

Изменение показателя контрастности пленки Kodak Tri-X Pan в зависимости от времени проявления и типов проявителя при температуре 20°C. Кривая 7—HC 110 (раствор B); 2—Polydol; 3—D-76; 4—0-76(1:1) и Microdol-X; 5—Micro-dol-X (1:3), температура 24°C; 6—DK-50(1:1).

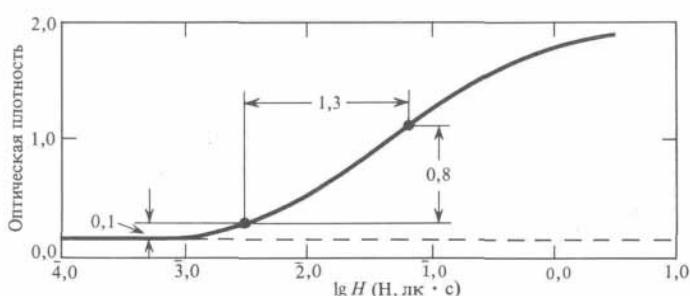
Когда имеется большая партия фотопленок, используемая в условиях, требующих высокой точности работы, обычно экспериментально определяют характеристическую кривую в условиях, идентичных тем, в которых будет использоваться пленка.

Чем круче характеристическая кривая, тем больше показатель контрастности. На рис. 8.5 кривая «Проявление 2» соответствует большему показателю контрастности по сравнению с кривой «Проявление 1». При одинаковой экспозиции кривая «Проявление 2» характеризуется большим диапазоном оптических плотностей  $D_{S2}$ , чем кривая «Проявление 1» ( $D_{S1}$ ). Следовательно, увеличение показателя контрастности любым способом приводит к увеличению диапазона оптических плотностей при данной экспозиции снимаемого объекта. В дальнейшем при обсуждении фотобумаг будет показано, что правильный показатель контрастности зависит и от свойств бумаги. Однако до рассмотрения характеристик фотобумаг необходимо установить роль каждого параметра, используемого при описании свойств пленки.

### Светочувствительность фотопленок

В гл. 2 было введено для определения экспозиций понятие светочувствительности фотопленки в единицах ASA. Строго говоря, светочувствительность пленки в единицах ASA определяется из стандартной характеристической кривой только для данной пленки, как показано на рис. 8.11. Характеристическая кривая считается стандартной, если изменение оптической плотности между величинами 0,1 и 0,9 над линией «Оптическая плотность основы и вуали» происходит при изменении логарифма экспозиции на 1,3. Процесс проявления должен быть осуществлен таким образом, чтобы реализовалась такая кривая. Т. е. стандартная характеристическая кривая определяется средним наклоном кривой. Экспозиция измеряется в единицах лк·с.

<sup>1)</sup> Kodak Black-and-White DataguiJc, Seventh Edition, Rochester, N. Y.: Eastman Kodak Company, 1980.



Пленки в единицах ASA равна  $ASA = 0,8/H$ , (8.5) где  $H$  — антилогарифм логарифма экспозиции, определенной вышеуказанным способом.

Это определение светочувствительности пленки дает величину минимальной экспозиции, которая приводит к образованию необходимого диапазона оптических плотностей пленки. Существуют по крайней мере три довода в пользу использования начальной области характеристической кривой для правильной экспозиции пленки. Во-первых<sup>1)</sup>, желательно использовать минимальную экспозицию, которая приводит к удовлетворительному отпечатку, для того чтобы можно было фотографировать при низких уровнях освещенности. На практике обычно намного чаще приходится сталкиваться с недостатком освещенности, чем с ее избытком. В случае избытка освещенности уменьшение экспозиции не представляет трудностей. Для пленок, обладающих повышенной светочувствительностью, требуется меньшая экспозиция с целью получения хорошего градиента оптической плотности пленки, чем для пленок с низкой светочувствительностью. Следовательно, величина  $H$  в выражении (8.5) уменьшается, а светочувствительность пленки в единицах ASA увеличивается. Стандартные характеристические кривые для двух типов пленок показаны на рис. 8.12. Из рисунка видно, как меняется светочувствительность пленки в зависимости от минимальной плотности. Используемые для определения единиц ASA значения логарифмов экспозиции отмечены на оси абсцисс, чтобы показать, как чувствительность пленки зависит от суммы плотностей основы и вуали.

Рассмотренное определение светочувствительности фотопленки относится к негативным черно-белым пленкам.

Ч Остальные причины будут рассмотрены в следующих главах. — Прим. перев.

Рис. 8.12.

Характеристические кривые для фотопленок Kodak Plus-X Pan (1) и Tri-X Pan (2).



Светочувствительность в единицах ASA для цветных негативных и обращаемых фотопленок определяется иначе, причем таким образом, что экспонометры, калиброванные в единицах светочувствительности ASA для черно-белых пленок, могут применяться также и для цветных негативных и обращаемых фотопленок. Светочувствительность в единицах ASA не определяется для фотопленок специального назначения, таких, как, например, высококонтрастные, рентгеновские и инфракрасные фотопленки. В этих случаях изготавливатели обычно указывают светочувствительность или индекс экспозиции, который должен быть использован для нахождения соответствующей экспозиции при определении уровня света экспонометрами, калиброванными в единицах ASA. Иногда шкалы экспонометров калибруются в единицах ANSI, которые полностью совпадают со шкалой ASA. Наряду с сенситометрической системой ASA, принятой в США, используются и другие системы. Так, в Англии используется система BS (Британский стандарт), в то время как в большинстве европейских стран принята шкала DIN (Deutsche Industrie Norm)<sup>1</sup>. Стандартные характеристические кривые для этих шкал определяются так же, как и для системы ASA, а чувствительность определяется в величинах экспозиции, превышающих уровень оптической плотности подложки и вуали на 0,1. Во всех трех шкалах стандартные значения чувствительности округляются до ближайшей трети обычной двукратной ступени. Шкалы BS и DIN имеют логарифмическую зависимость от обратной экспозиции<sup>2\*</sup> вместо обратнопропорциональной зависимости для шкалы ASA [формула (8.5)]. В табл. 8.3 представлены сравнительные значения светочувствительности в единицах ASA, DIN, BS и ГОСТ<sup>3</sup> для величины ASA от 100 до 1000.

Чтобы получить величины чувствительности в единицах

<sup>"</sup> В СССР принята сенситометрическая система ГОСТ, близкая к системе ASA. — Прим. перев.

<sup>2</sup>\* Светочувствительность в системе DIN определяется следующим образом:  $DIN = 10^{lg(I/I_0)}$ . — Прим. перев.

<sup>3</sup>) В связи с различием критериев светочувствительности существуют только приближенные способы перевода величин светочувствительности из одной системы в другую. Для удобства читателей в табл. 8.3 введены величины светочувствительности в единицах ГОСТ, отсутствующие в оригинале. — Прим. перев.

**Таблица 8.3. Значения светочувствительности фотопленок в единицах ASA, DIN, BS и ГОСТ**  
ASA DIN BS ГОСТ

|      |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|
| 1000 | 31° | 41° | 700 |
| 800  | 30° | 40° |     |
| 640  | 29° | 39° | 500 |
| 500  | 28° | 38° | 350 |
| 400  | 27° | 37° |     |
| 320  | 26° | 36° | 250 |
| 250  | 25° | 35° | 180 |
| 200  | 24° | 34° |     |
| 160  | 23° | 33° | 130 |
| 125  | 22° | 32° | 90  |
| 100  | 21° | 31° |     |
| 80   | 20° | 65  |     |
| 64   | 19° | 45  |     |
| 40   | 17° | 32  |     |

ASA, большие чем 1000, приведенные в таблице значения умножаются на 10. Делением на 10 или 100 можно получить меньшие значения чувствительности фотопленки. Обе шкалы DIN и BS

увеличиваются на единицу по мере увеличения чувствительности на каждую третью двукратного интервала. Различие между этими двумя шкалами является следствием разницы начальных значений каждой. Значение единицы по шкале DIN соответствует значению единицы по шкале ASA. Согласно принятому соглашению между США и европейскими странами применяются обозначения чувствительности как в единицах ASA, так и в единицах DIN с помощью обозначения ISO. Например, ISO 125/22° обозначает фотопленку, для которой чувствительность в единицах ASA составляет 125, а в единицах DIN 22°.

**Пример 8.5.** Определим индекс экспозиции характеристической кривой на рис. 8.11. Найдем светочувствительность фотопленки в единицах ASA, DIN и BS.

Из характеристической кривой найдем, что  $\lg H$  для точки чувствительности составляет  $-2,5$  и антилогарифм равен  $10^{-2,5}$ . Отсюда получим экспозицию  $0,00316$  лк·с, для которой индекс экспозиции составляет  $0,8/0,00316 = 267$ . Эта величина весьма близка к значению чувствительности фотопленки 250 ASA, и, поскольку стандарты допускают некоторые отклонения, найденное значение и должно быть обозначено на пленке. Соответствующая чувствительность в единицах DIN составляет  $25^\circ$  (табл. 8.3), а по шкале BS  $35^\circ$ .

Из вышесказанного следует, что неуместно говорить о зависимости чувствительности пленки в единицах ASA от процесса проявления (времени, температуры и способа проявления), так как чувствительность определяется только для определенной характеристической кривой, отвечающей требованиям стандарта.

Однако читатель может удивиться, узнав, что индекс экспозиции зависит от процесса проявления. Представленные в табл. 8.4 данные показывают зависимость индекса экспозиции и показателя контрастности от времени проявления для пленки Kodak Plus-X Pan чувствительностью 125 ASA, которая проявляется в течение 22 мин.

**Таблица 8.4. Зависимость показателя контрастности и индекса экспозиции от времени проявления для фотопленки чувствительностью 125 ASA**

| Время проявления, мин | Показатель контрастности | Индекс экспозиции |
|-----------------------|--------------------------|-------------------|
| 22                    | 1,00                     | 200               |
| 18                    | 0,85                     | 178               |
| 12                    | 0,70                     | 145               |
| 8                     | 0,56                     | 122               |
| 4,5                   | 0,40                     | 53                |

Пленка Kodak D-76, разбавленном в отношении 1:1.

Отметим, что как индекс экспозиции, так и показатель контрастности увеличиваются с увеличением времени проявления. Это свойство может использоваться в случае недоэкспонирования пленки и будет рассматриваться в следующей главе. В случае недоэкспонирования применяются большие значения индекса экспозиции по сравнению с чувствительностью пленки в единицах ASA.

#### **Контрастность фотографической бумаги**

До сих пор под оптической плотностью подразумевалась плотность пропускания. Однако при обсуждении свойств фотобумаги необходимо пользоваться понятием оптической плотности в отраженном свете<sup>1</sup>). Для нахождения зависимости оптической плотности бумаги от экспозиции может быть проведен эксперимент, аналогичный описанному выше при обсуждении свойств фотопленок. Для этого листы фотобумаги освещают светом различной интенсивности, проявляют и измеряют свет, отраженный от полученных отпечатков. Очевидно, что от неэкспонированной фотобумаги будет отражаться значительно больше света по сравнению с бумагой, подвергнутой длительному освещению. Оптическая плотность отпечатка  $D_r = \lg (I/R)$ , (8.6) где  $R$  — отражательная способность бумаги, которая определяется следующим образом:  $I = U/(8.7)$

Здесь  $I_R$  — интенсивность света, отраженного от экспонированной и проявленной бумаги;  $/_0$  — интенсивность света, отраженного от основы бумаги<sup>2)</sup>.

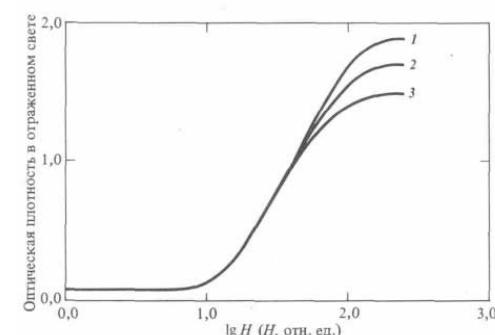
График изменения оптической плотности как функции  $\lg H$  для трех различных видов поверхности фотобумаги представлен на рис. 8.13. Для того чтобы можно было совместить начальные участки характеристических кривых, экспозиции выражены в относительных единицах. Приведенные характеристические кривые показывают, что глянцевая бумага (1) дает самый большой тональный интервал, а матовая (3) — наименьший. Это объясняется главным образом высокой отражательной способностью глянцевой фотобумаги. Интервал тонов, иногда

называемый контрастностью, для глянцевой бумаги обычно составляет 70/1, для полуматовой — 35/1 и для матовой — 20/1.

<sup>1)</sup> Иногда эту величину обозначают как альбедо. В дальнейшем при обсуждении свойств фотобумаги под оптической плотностью будет подразумеваться оптическая плотность в отраженном свете. — Прим. перев.

<sup>2)</sup> Величина  $/_0$  обычно представляет собой интенсивность света, отраженного от незэкспонированной и непроявленной, а только отфиксированной полоски испытываемой фотобумаги. — Прим. перев.

Рис. 8.13. Характеристические кривые типичных глянцевой (1), полуматовой (2) и матовой (3) черно-белых фотобумаг.



Этот интервал тонов, выраженный логарифмически, иногда называют интервалом оптических плотностей.

**Пример 8.6.** Найдем интервал оптических плотностей и контрастность фотобумаг, характеристические кривые которых показаны на рис. 8.13.

Минимальная оптическая плотность, которая может быть воспроизведена каждым типом фотобумаги, составляет около 0,1. Максимальная оптическая плотность для глянцевой бумаги составляет около 1,9. Следовательно, интервал оптических плотностей равен 1,9 - ОД = 1,8. Найдя антилогарифм 1,8, получим, что контрастность составляет 63/1. Аналогично определим интервалы оптических плотностей для полуматовой (1,6) и матовой (1,4) бумаг. Контрастность для полуматовой бумаги равна 40/1 и для матовой — 25/1.

#### Типы фотобумаг

Участки с различной оптической плотностью негатива, помещенного в фотоувеличитель, «модулируют» свет лампы увеличителя, приводя к определенному интервалу экспозиций на фотобумаге. Слабоконтрастные негативы создают малый интервал экспозиций, а высококонтрастные — значительный. В большинстве случаев используется весь тональный диапазон фотобумаги. Определенный тип<sup>1)</sup> фотобумаги обычно изготавливается с несколькими степенями контрастности для лучшего подбора соответствующей фотобумаги к негативам различной контрастности. Градация фотобумаги по степени контрастности связана с различными интервалами экспозиции, в которых они могут использоваться. Интервал экспозиций для данного номера фотобумаги не может значительно меняться при варьировании процесса проявления. На рис. 8.14 представлены характеристические кривые шести различных номеров одного типа бумаги.

Ч в данном случае под определенным типом фотобумаги подразумеваются бумаги, в которых используются различные светочувствительные компоненты, например бромосеребряная, иодосеребряная, хлоробромосеребряная и другие типы бумаг. — Прим. перев.

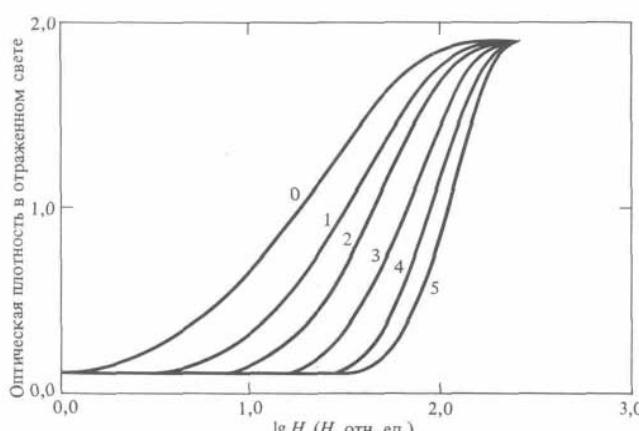


Рис. 8.14. Характеристические кривые шести различных по контрастности фотобумаг одного типа

Для удобства сравнения экспозиция выражена в относительных единицах. Числа от 0 до 5 на рисунке являются «номерами» фотобумаг, обозначающими ее соответствующую контрастность. С увеличением номера бумаги интервал экспозиций, в котором распределен интервал оптических плотностей, уменьшается. Бумаги с большим номером (например, 4) более контрастны, чем

мягкие фотобумаги (например, с номером 1). Не все типы фотобумаг изготавляются всех номеров контрастности. Например, некоторые глянцевые бумаги имеют только пять номеров контрастности. Нумерация введена таким образом, чтобы с нормального негатива лучшие результаты получались на бумаге номер 2, хотя некоторые фотографы предпочитают пользоваться фотобумагой номер 3.

Существуют *фотобумаги переменной контрастности*. Этот эффект достигается использованием двух фотоэмульсионных слоев. Первый слой обладает низкой контрастностью и чувствителен только к синему свету. Второй слой высококонтрастный и чувствителен к синему и желтому свету. Однако синий свет не может достичь этого слоя из-за того, что эмульсия покрыта специальным фильтровым слоем, непрозрачным для синего света и разрушающимся в процессе проявления. Контрастность фотобумаги изменяется благодаря использованию при печати светофильтров различных цветов, помещенных между лампой фотоувеличителя и бумагой для управления экспозициями этих двух эмульсий. Обычно использование различных светофильтров позволяет достичь изменения контрастности фотобумаги с первого по четвертый номер с точностью до половины ступени. Очевидным преимуществом использования такой фотобумаги для фотолюбителя является ненужность приобретения фотобумаг с различной степенью контрастности. Однако фотобумага переменной контрастности настолько чувствительна к свету в желтой части спектра, что требует использования специального *неактиничного света* лампы с парами натрия или особых *защитных светофильтров*. Для описания интервала экспозиций, приводящих к фотоотпечаткам от самого светлого до самого темного тонов, используется понятие полезного интервала логарифмов экспозиций (рис. 8.15).

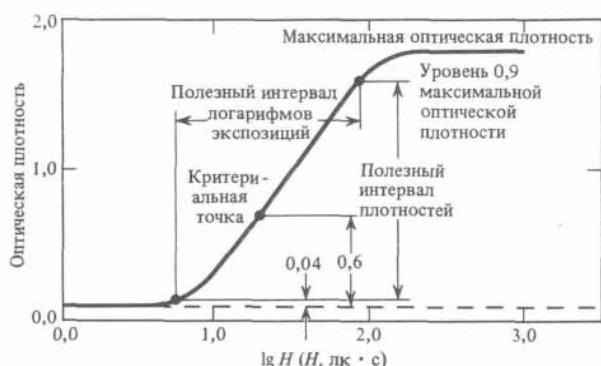


Рис. 8.15.

Характеристическая кривая типичной фотобумаги и определение полезного интервала логарифмов экспозиций, интервала плотностей и критериальной точки.

#### Таблица 8.5. Полезный интервал логарифмов экспозиций для фотобумаг различной степени контрастности

| Контрастность фотобумаги | 12345 | Полезный интервал логарифмов экспозиций (фотографическая широта L) | 1,5 | 1,3 |
|--------------------------|-------|--|-----|-----|
| 1,1                      | 0,9   | 0,7  |     |     |

Самые светлые тона, которые называются светами, определяются как тона, имеющие плотность, на 0,04 единицы превышающую уровень оптической плотности основы и вуали, в то время как самый черный тон соответствует 0,9 максимальной плотности. Полезный интервал логарифмов экспозиций определяется как  $\lg H_6 - \lg H_4$ , где  $H_6$  и  $H_4$  — экспозиции, необходимые для создания самого темного и самого светлого тонов соответственно. Типичные значения полезного интервала логарифмов экспозиций для фотобумаг различной степени контрастности приведены в табл. 8.5.

Иногда полезно знать значения светочувствительности фотобумаг так же, как и светочувствительность фотопленки, в единицах ASA (например, когда необходимо определить правильную экспозицию фотобумаги при печати). Для некоторых бумаг указывается чувствительность в единицах ANSI. Процесс проявления фотобумаг описывается точно так же, как для фотопленок с известной чувствительностью. Для бумаг, проявленных согласно предъявляемым требованиям, чувствительность в единицах ANSI определяется как  $5=10^3/\bar{Y}_{06}$ , (8.8) где  $H_{06}$  — экспозиция, необходимая, чтобы создать оптическую плотность на 0,6 выше плотности основы и вуали (рис. 8.15). Величины чувствительности фотобумаги в единицах ANSI аналогичны величинам чувствительности фотопленки в единицах ASA (табл. 8.3), за исключением того, что чаще используется величина 630, а не 640 в качестве основного значения между 500 и 800. Для случаев, когда стандарт ANSI неприменим (например, сенсибилизированная бумага), иногда используют понятие *Аффективная светочувствительность* фотобумаги.

**Пример 8.7.** Найдем полезный интервал логарифмов экспозиций и светочувствительность фотобумаги в единицах ANSI для случая, представленного на рис. 8.15.

Согласно рис. 8.15,  $\lg H_B = 1,9$  и  $\lg H_A = 0,7$ . Следовательно, полезный интервал логарифмов экспозиций равен 1,2, что соответствует фотобумаге номер 2 или 3. Из рисунка получим  $\lg \bar{Y}_{06} = 1,3$ . Антилогарифм 1,3 равен 20. Следовательно светочувствительность бумаги в единицах ANSI составляет  $1000/20 = 50$ , т. е. довольно низка.

**Пример 8.8.** Воспользуемся фотобумагой переменной контрастности, чувствительность которой в единицах ANSI без светофильтра составляет 320, т. е. контрастность приблизительно соответствует фотобумаге номер 2. Для увеличения контрастности применим светофильтр; в результате получим контрастность, соответствующую фотобумаге номер 3. При этом чувствительность бумаги в единицах ANSI уменьшилась до 160. На сколько необходимо изменить экспозицию при печати, чтобы средняя плотность отпечатка осталась прежней?

Поскольку чувствительность фотобумаги в единицах ANSI уменьшается наполовину, экспозиция должна быть удвоена путем увеличения либо отверстия диафрагмы на одну ступень, либо времени экспонирования при условии выполнения закона взаимозаместимости в рассмотренном примере.

#### Роль фотоувеличителя

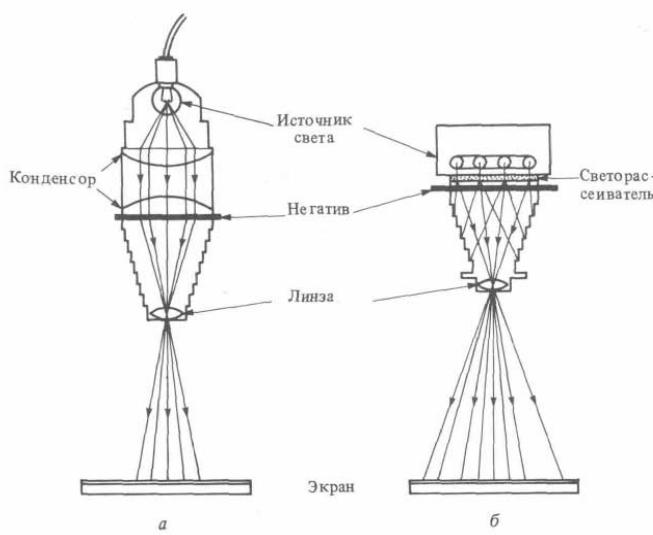
Интервал оптических плотностей негатива зависит от распределения яркостей в снимаемом сюжете и условий обработки негатива. Этот интервал должен быть перенесен на фотобумагу (рис. 8.15). Фотобумагу необходимо подбирать таким образом, чтобы ее полезный интервал экспозиций соответствовал интервалу плотностей негатива. В большинстве случаев поступают именно так. Однако не всегда надо следовать этому правилу, особенно когда необходимо достичь специального эффекта.

При изготовлении отпечатка контактным способом источник света практически не влияет на конечный результат. Однако в большинстве случаев при фотопечати используется фотоувеличитель, с помощью источника света которого устанавливается связь между полезным интервалом экспозиций фотобумаги и тональностью негатива. Фотоувеличители в зависимости от устройства осветителя могут быть разделены на два основных типа — *диффузные*<sup>1</sup> и *конденсорные*, каждый из которых отражает целый ряд различных конструктивных решений.

<sup>1</sup>) Фотоувеличитель с освещением негатива рассеянным светом — бесконденсорный фотоувеличитель — *Прим. перев.*

Рис. 8.16.

Схема конденсорного (а) и диффузного (б) фотоувеличителей



В конденсорном фотоувеличителе (рис. 8.16, а) практически точечный источник света располагается позади фокуса системы, обычно состоящей из комбинации двух положительных линз и называемой *конденсором*. В результате негатив освещается сходящимся пучком света, который модулируется негативом главным образом вследствие поглощения, а также частичного рассеяния.

Прошедший свет фокусируется объективом фотоувеличителя на экран. В диффузном фотоувеличителе (рис. 8.16, б) конденсор заменен *рассеивателем*

(обычно пластинкой матового или молочного стекла), который рассеивает свет, падающий на негатив. Рассеянные лучи модулируются негативом, а лучи, проходящие сквозь объектив фотоувеличителя, фокусируются на экране. Увеличение изображения и его фокусировка осуществляются таким же способом, как и в случае конденсорного фотоувеличителя. Модулированный свет, достигающий объектива фотоувеличителя в конденсорном фотоувеличителе, сконцентрирован в большей степени, чем в диффузном увеличителе. Следовательно, отпечаток, полученный с помощью конденсорного увеличителя, имеет более высокую контрастность, чем в случае применения диффузного фотоувеличителя. Поэтому негативы для диффузного фотоувеличителя должны быть проявлены более энергично, чтобы иметь больший диапазон оптических плотностей (а следовательно, и коэффициент контрастности), чем негативы для конденсорного фотоувеличителя. Чтобы скрыть мелкие дефекты или недостатки изображения в негативе, лучше использовать диффузные фотоувеличители; однако контуры изображения будут получаться не такими резкими, как в случае конденсорного фотоувеличителя.

#### Воспроизведение тонов

Яркости объекта могут быть соотнесены с интервалом оптических плотностей полученного отпечатка. Отметим, что интервал яркостей объекта видоизменяется вследствие светорассеяния

объектива. Получаемое оптическое изображение видоизменяется в негативе, затем негативное изображение видоизменяется фотоувеличителем, а оптическое изображение созданное фотоувеличителем, видоизменяется фотобумагой. В результате получается фотоотпечаток, передача тональностей которого должна быть сравнима с исходным объектом. На рис. 8.17 приведена схема тонов на всех стадиях получения fotosнимка обычного сюжета при сохранении средних тонов и сжатии затененных и светлых участков.

Из-за светорассеяния объектива часть света наиболее светлых участков будет рассеиваться и попадать в область теней оптического изображения. При этом, если уменьшение яркости светлых участков незначительно, увеличение яркости затененных участков будет существенным. Другими словами, происходит как бы сжатие (сокращение) теневой области тонов.

Интервал оптических плотностей негатива (около 1,05) значительно меньше, чем у пленки (около 3) и фотобумаги. Отметим, что используется начальная часть характеристической кривой негатива, соответствующая низким оптическим плотностям. При этом сохраняется строгое соответствие между средними тонами объекта и отпечатка, что и является второй причиной<sup>1)</sup> использования начального участка характеристической кривой. Рассмотренные закономерности представлены на рис. 8.18. В квадранте 1 построен начальный участок характеристической кривой, представляющий зависимость между яркостями объекта (интервал экспозиций негатива) и оптическими плотностями негатива.

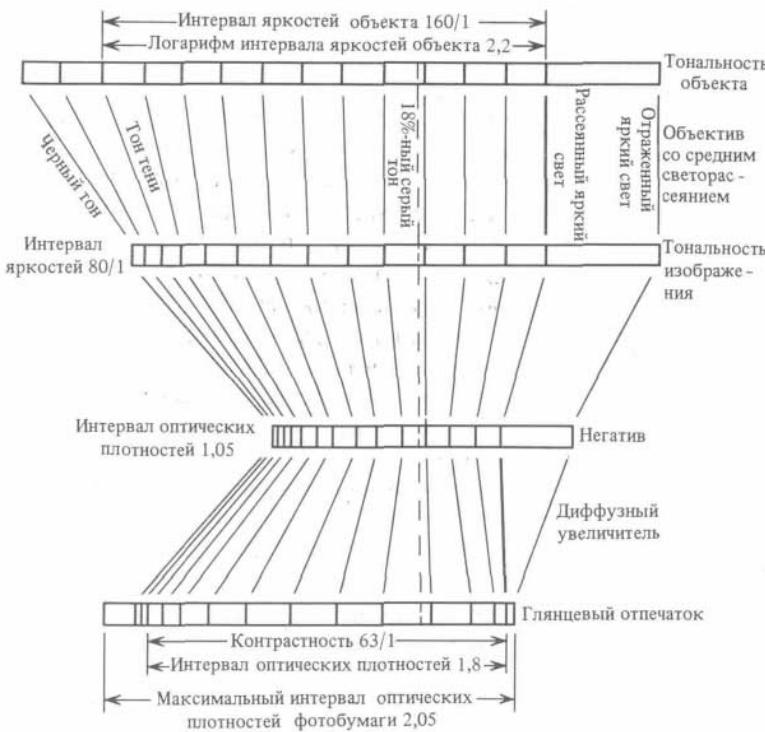


Рис. 8.17.

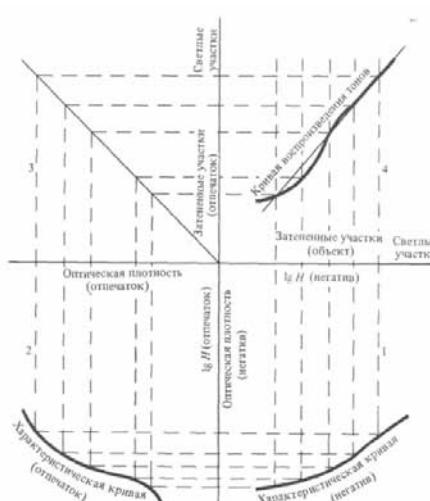
Схема типичного фотографического воспроизведения тонов

В квадранте 2 показано, как яркости объекта передаются на отпечатке в процессе увеличения. Фактически в квадранте 2 построена характеристическая кривая для фотобумаги, повернутая по часовой стрелке на 90° относительно ее обычного положения (см., например, рис. 8.15). (Отметим сжатие теней.) Квадрант 3 используется для осуществления графического переноса тональностей отпечатка в квадрант 4, в котором строится кривая, выражающая зависимость между яркостями и их деталями в объекте и плотностями и их различиями в позитиве. Эта кривая называется

кривой воспроизведения. Отметим, что пропорциональная передача яркостей шкалой тонов сохраняется пропорциональной в ее средней части при некотором сжатии светлых и затененных участков.

Рис. 8.18.

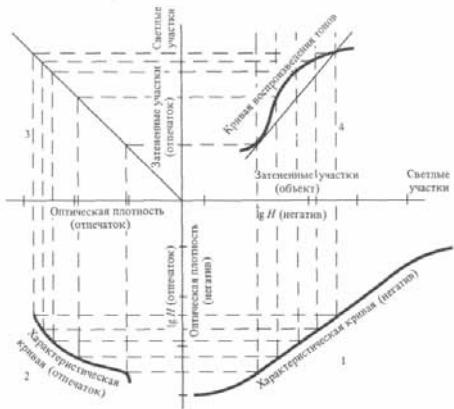
Взаимосвязь между интервалом яркостей объекта и интервалом тонов отпечатка при использовании нижней части характеристической кривой негатива.



<sup>4</sup> См. разд. «Светочувствительность фотопленок». — Прим. перев

На рис. 8.19 представлена кривая воспроизведения тонов в зависимости от яркости объекта при использовании прямолинейного участка характеристической кривой негатива. Отметим, что соотношение между яркостями объекта и плотностями тонов отпечатка существенно нелинейное и кривая воспроизведения напоминает перевернутую характеристическую кривую для фотобумаги.

Рис. 8.19.



Взаимосвязь между интервалом яркостей объекта и интервалом тонов отпечатка при использовании прямолинейного участка характеристической кривой негатива.

Сравнение рис. 8.18 и 8.19 показывает, что начальный участок характеристической кривой негатива используется для уменьшения влияния на начальный участок характеристической кривой фотобумаги. Использование начального участка характеристической кривой негатива ухудшает линейность кривой воспроизведения для верхнего участка характеристической кривой позитива. Однако при печати обычно используется лишь незначительная часть верхнего участка характеристической кривой (рис. 8.15). Если наиболее важная часть снимка получилась практически черной, желательно изменить экспозицию и (или) процесс проявления, чтобы уменьшить сжатие затененных участков

фотоснимка. Подробное изложение этих вопросов приведено в следующей главе.

В проведенном выше обсуждении влияние светорассеяния объективом фотоаппарата или рассеяния в процессе увеличения на кривую воспроизведения тонов незначительно. Как уже упоминалось, светорассеяние приводит к сжатию тонов в тенях (рис. 8.17). В процессе фотоувеличения часть света, прошедшая через оптически менее плотные участки негатива (тени объекта), освещает светлые участки отпечатка и стремится сжать света отпечатка (рис. 8.17). Этот эффект наиболее сильно выражен в случае использования увеличителя с диффузным освещением.

Из рис. 8.18 видно, что интервал оптических плотностей негатива должен обеспечивать интервал экспозиций фотобумаги, необходимой для получения полного интервала плотностей отпечатка. По мере того как увеличивается интервал плотностей (и коэффициент контрастности) негатива, должна использоваться фотобумага с большим полезным интервалом логарифмов экспозиций (более мягкая фотобумага). Следовательно, номер применяемой фотобумаги уменьшается с увеличением коэффициента контрастности и интервала оптических плотностей негатива. Точное соотношение между коэффициентом контрастности и номером фотобумаги зависит от объекта съемки, фотоувеличителя, процесса проявления и желаемого эффекта. В работе<sup>1</sup> приведено подробное обсуждение этого вопроса. Данные этой работы можно использовать в качестве отправной точки для определения соответствующей связи между фотопленкой и фотобумагой. Однако к наилучшим результатам приводят эксперименты с конкретным оборудованием и фотоматериалами.

### Экспозиционные эффекты

Иногда в процессе экспозиции имеют место довольно неожиданные эффекты. Названия некоторых из них связаны с их сущностью, другие же названы в честь их первооткрывателей.

Вспомним, что закон взаимозаместимости устанавливает связь между экспозицией пленки  $H$ , освещенностью  $E$  и временем экспонирования  $t$ :  $H = E \cdot t$ . Это значит, что экспозиции при относительном отверстии 1:16 и выдержке 1/125 с, а также при 1:11 и 1/250 с дают одинаковую оптическую плотность почернения фотопленки при условии неизменности освещенности объекта. Однако при очень высоких или очень низких освещенностях этот закон не выполняется. Это явление называется *нарушением закона взаимозаместимости*<sup>2</sup>.

Если освещенность низкая, то данного зерна в единицу времени будут достигать всего несколько фотонов, поэтому рост серебряного пятна на поверхности зерна до размера, необходимого для проявления, требует значительного времени. Одиночный атом серебра внутри или на поверхности зерна галогенида серебра весьма нестабилен, поскольку вследствие теплового движения происходит его рекомбинация с атомом галогена. Поэтому скрытое изображение распадается так же быстро, как возникает. Процесс распада конкурирует с процессом экспозиции, что и приводит к отклонению от закона взаимозаместимости при низких освещенностях. Если освещенность слишком высокая, то в единицу времени с данным зерном сталкивается много фотонов, образуя большое число свободных электронов, ионов серебра и атомов галогенов. Поэтому эффективно протекают реакции рекомбинации, и, следовательно, значительное количество электронов и ионов серебра не достигает центра проявления на поверхности зерна, что и приводит к отклонению от закона взаимозаместимости при высокой интенсивности света.

<sup>1</sup> Ч Kodak Professional Black-and-White Films; Kodak B/W Photographic Papers G-I, Eastman Kodak Company, 1978. <sup>2</sup>) Иногда это явление называется эффектом Шварцшильда или явлением

невзаимозаместимости. — *Прим. перев.*

Отклонение от закона взаимозаместимости является следствием как слишком слабой, так и слишком сильной освещенности. Однако, поскольку число фотонов, попадающих на зерно в единицу времени, — критический параметр, границы нарушения закона взаимозаместимости обычно определяются в величинах времени экспонирования. Обычно отклонение от закона взаимозаместимости при высоких интенсивностях имеет место для времен экспонирования  $1/10\ 000$  с или меньше, а при низких интенсивностях — для времен экспонирования 1 с или больше. Точные значения определяются свойствами фотопленки.

В некоторых случаях экспозиция фотопленки настолько мала, что проявляемое скрытое изображение не образуется. Например, это может быть в случае применения фотографии в научных целях. Предположим, что порог проявления определяется четырьмя атомами серебра, образующими одно пятно серебра на поверхности зерна галогенида серебра. Кроме того, предположим, что используемая экспозиция обеспечивает образование только одного атома серебра на тех зернах, которые получают максимум экспозиции. Если теперь пленку проявить обычным способом, то видимого изображения не образуется. Однако если всю пленку равномерно проэкспонировать светом с освещенностью, достаточной, чтобы вызвать образование трех атомов серебра на каждом зерне, то зерна, на поверхности которых при последующей экспозиции дополнительно образуется по одному атому серебра, смогут проявиться. Хотя все остальные зерна не способны к проявлению, видимое изображение будет создано. Этот процесс дозированной засветки фотопленки, приводящий к увеличению пороговой чувствительности, является одним из способов гиперсенсибилизации фотоматериалов<sup>1^</sup>.

Хотя рассмотренный пример является умозрительным, он хорошо поясняет принцип гиперсенсибилизации. Этот метод не настолько хороший, как показано в нашем примере, поскольку здесь также играют роль термически возбужденные нестабильности, которые могут приводить к возникновению явления невзаимозаместимости при низких интенсивностях. К наилуч-

" К другим способам гиперсенсибилизации относятся: обработка фотоматериала в растворах амиака или азотнокислого серебра, воздействие на фотослой амиачных растворов солей серебра, обработка парами ртути, промывание в течение 1—1,5 ч в воде и последующая сушка. — *Прим. перев.*

шим результатам приводит применение гиперсенсибилизации непосредственно перед образованием скрытого изображения при не слишком высокой температуре пленки и при условии проявления пленки сразу же после экспозиции. Понижение температуры фотопленки во время экспозиции замедляет образование термически возбужденных нестабильностей. Если между экспозицией и проявлением есть некоторая задержка по времени, то охлаждение фотопленки также помогает сохранить скрытое изображение. Понятие латенсификация<sup>1^</sup> определяет процесс, в котором недостаточно экспонированная фотопленка подвергается слабой дополнительной засветке, что приводит к усилинию деталей темных участков изображения. Процесс латенсификации так же, как и гиперсенсибилизация, может быть осуществлен с помощью химических методов.

Эффект прерывистого освещения также является примером отклонения от закона взаимозаместимости при использовании высоких интенсивностей. На рис. 8.20 представлены две ситуации: 1) одна из двух идентичных фотопленок подвергается экспозиции при высокой освещенности в течение четырех отрезков времени, разделенных равными промежутками времени, когда пленка не освещается (сплошные линии), 2) непрерывная экспозиция второй пленки равна суммарной прерывистой экспозиции, которой подвергалась первая пленка (штриховые линии). Если пленки проявить одинаковым образом и если освещенность при экспонировании была достаточно высокой, то оптическая плотность негатива в первом случае будет больше, чем во втором. Высокая освещенность приводит к образованию значительной концентрации электронов, ионов серебра и атомов галогенов, но в паузах между экспозициями образования этих частиц не происходит, а часть атомов галогенов диффундирует в слой желатины, где они гибнут<sup>2^</sup>. Поэтому отклонение от закона взаимозаместимости уменьшается, и оптическая плотность негатива будет выше, чем во втором случае, когда не происходит прерывания.

Оптическая плотность фотопленки увеличивается с увеличением экспозиции до тех пор, пока весь галогенид серебра не будет переведен в состояние, способное к проявлению. Если же интенсивность света, падающего на пленку, очень высока, то оптическая плотность даже может уменьшится.

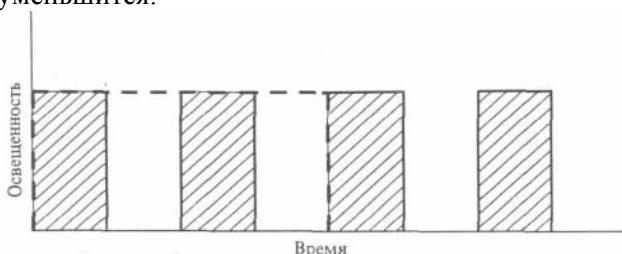


Рис. 8.20.  
Графическое объяснение эффекта прерывистого освещения.

<sup>1</sup> Латенсификация, или усиление скрытого изображения, в фотографической практике применяется крайне редко из-за плохой воспроизводимости. — Прим. перев.

<sup>2</sup> Точный механизм, объясняющий отклонение от закона взаимозаместимости в этом случае, до сих пор не установлен. — Прим. перев.

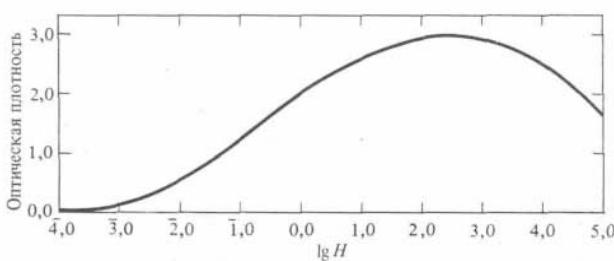


Рис. 8.21.

Характеристическая кривая фотопленки, экспонированной при высокой освещенности.

При высоких интенсивностях характеристическая кривая может иметь вид, показанный на рис. 8.21. Этот эффект загиба характеристической кривой, по всей видимости, объясняется тем же самым явлением, которое вызывает отклонение от

закона взаимозаместимости при высоких интенсивностях. Слишком большое число фотонов, взаимодействующих с зернами, вызывает образование ионов серебра, электронов и атомов галогенов с очень высокой концентрацией, что является причиной эффективного протекания реакций рекомбинации, приводящих к уменьшению общей плотности негатива (явление *соляризации*).

Иногда для достижения частичного обращения тонов фотоснимка используют эффект, который часто неправильно называют «эффектом соляризации». Правильнее называть этот эффект *эффектом Сабатье*. После образования на фотобумаге скрытого изображения она проявляется стандартным способом и промывается; затем отпечаток освещается рассеянным светом в течение короткого промежутка времени (например, при включении комнатного освещения на несколько секунд, после чего вновь проявляется, фиксируется и промывается). На рис. 8.22 для сравнения приведены два отпечатка, полученные с одного негатива, но в случае *б* был применен эффект Сабатье.

Эффект возникает главным образом благодаря различной экранировке неэкспонированных зерен галогенида серебра во время второй экспозиции. Экранировка обеспечивается зернами серебра, образованными в течение первой экспозиции. Участки снимка, наиболее освещенные в течение первой экспозиции, вследствие экранировки будут наименее освещенными во время второй экспозиции, что и приводит к обращению тональностей. Однако обращение не будет полным, поскольку сохраняется все серебро, образованное при двух проявлениях.

Эффект, позволяющий получить прямой позитив, называется *эффектом Альберта*. В этом процессе на пленке создают сильно переэкспонированное скрытое изображение, а затем обрабатывают ее в кислоте, которая растворяет серебро скрытого изображения; после этого пленку экспонируют рассеянным светом, проявляют и фиксируют. В результате получается прямой позитив, очень похожий на позитив, полученный в процессе обращения, который описан в гл. 7. Переэкспонирование на первой стадии может быть заменено нормальной экспозицией с последующим проявлением в слабом растворе проявителя.



Рис. 8.22.

Обычный снимок (*а*) и снимок, полученный с использованием эффекта Сабатье (*б*). Фото И Джоул Life Magazine, Copyright ©1970 Time.

Эффект *Крайдена*, или эффект черной молнии, — еще одно явление, причиной которого, по-видимому, является соляризация. На рис. 8.23 представлена фотография, сделанная с негатива, экспонированного днем во время грозы. Черная вертикальная разветвленная линия в левой части снимка (отмечена стрелкой вверху) вызвана интенсивной вспышкой молнии в начале экспозиции. Освещенность, созданная молнией, была очень высокой и вызвала соляризацию в крайней степени. Распад зерен продолжался в течение всей экспозиции, что привело к невозможности регистрации фонового освещения этими зернами. В результате в соответствующих местах фотопленки создалось состояние кажущегося отсутствия экспозиции, т.

вызывая соляризацию в крайней степени. Распад зерен продолжался в течение всей экспозиции, что привело к невозможности регистрации фонового освещения этими зернами. В результате в соответствующих местах фотопленки создалось состояние кажущегося отсутствия экспозиции, т.

е. образовалась черная линия.

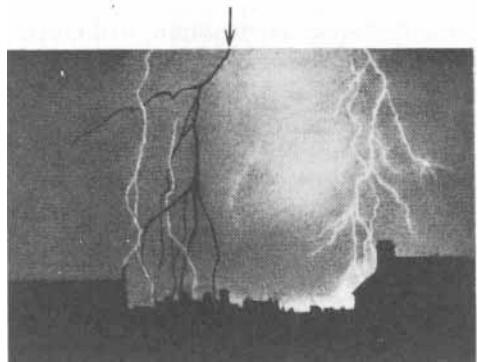


Рис. 8.23.

Иллюстрация эффекта Клайдена (эффект черной молнии) Воспроиз водится с разрешения музея Кодак, Хэрроу

В качестве последнего примера экспозиционных эффектов рассмотрим **эффект Гершеля**. Если на ортохроматической фотобумаге (или на обычной фотобумаге) создано скрытое изображение и затем фотобумага освещается красным светом, к которому она нечувствительна, то наблюдается разрушение скрытого изображения. В этом случае проявленное изображение будет менее плотным по сравнению со снимком, неосвещенным красным светом.

Полагают, что фотоны красного света обладают достаточной энергией для того, чтобы повторно ионизировать серебро, которое находится на поверхности зерна, способного к проявлению.

Образовавшийся ион проникает в центр зерна, где рекомбинирует со свободным электроном и стабилизируется. Таким образом, размеры пятна серебра на поверхности зерна будут уменьшаться, и часть скрытого изображения разрушится. Все это происходит, несмотря на то что фотону не хватает энергии для освобождения электрона из пары атомов галоген — серебро в зерне. Эта рекомбинация может иметь место, так как пятно серебра на поверхности состоит из стольких атомов серебра, что оно совершенно нестабильно. Аналогичный эффект может наблюдаться на ортохроматической или панхроматической пленке, облученной инфракрасным излучением.

#### Зернистость фотоматериалов

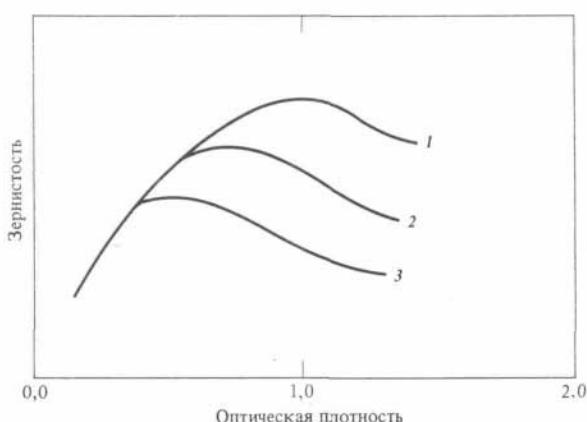
Поскольку изображение, сформированное на негативе или на отпечатке, представляет собой набор зерен серебра, то при значительных увеличениях в процессе фотопечати эти скопления зерен будут видны невооруженным глазом. В некоторых случаях зернистость изображения используют для получения определенного художественного эффекта, хотя вообще говоря зернистость является нежелательным явлением.

Понятие **зернистости** связано с субъективным восприятием снимка. Зернистость определяется различными способами, но мы воспользуемся определением, используемым в эксперименте, описанном ниже. Предположим, что фотопленка последовательно экспонируется так же, как описано в примере 8.3. После проявления получится набор негативов с различной оптической плотностью, с помощью которых изготавливаются фотоотпечатки с одним и тем же увеличением. Полученные снимки одинаково освещаются, и наблюдатель приближается к каждому из них на такое расстояние, когда зерна становятся различимыми. Это расстояние и называется зернистостью<sup>1</sup>). Отметим, что чем меньше зернистость, тем меньше должны быть наблюдаемые зерна. Если изобразить зернистость в виде

"Один из наиболее простых способов определения зернистости предложил Ю. Гороховский. Величина зернистости определяется из выражения  $q = 100/n$ , где  $q$  — фактор зернистости,  $n$  — увеличение, при котором зернистость становится заметной. — Прим. перев.

Рис. 8.24.

Зависимость зернистости от оптической плотности негатива и условий освещения: кривая 1 — яркое освещение, 2 — среднее освещение, 3 — слабое освещение



функции оптической плотности, то получим график, приведенный на рис. 8.24, из которого видно, что зернистость светлых участков незначительна, средних по освещенности участков максимальна и затененных уменьшена. Увеличение освещенности отпечатка приводит к росту зернистости. Отметим, что увеличение освещенности снимка смещает максимум зернистости снимка к более высоким оптическим плотностям. Необходимо иметь в

виду, что зернистость, наблюданная на правильно изготовленном отпечатке, вызывается наличием зернистости негатива, хотя определение зернистости связано с характеристикой отпечатка. Если оптическая плотность отпечатка в отраженном свете увеличивается<sup>1</sup>), то зерна будут труднее различить, поскольку количество отраженного света уменьшается и, следовательно, зернистость

уменьшится.

Зернистость негатива не представляет особого интереса, так как обычно черно-белые негативы не рассматриваются, а только используются в фотоувеличителе для изготовления отпечатков. Однако было бы весьма полезно применять для описания зернистой структуры негатива понятие зернистости, которое в определенном смысле относилось бы к его использованию. Этим условиям отвечает понятие *гранулярность*, которое определяется следующим образом. Представим себе, что денситометр<sup>2</sup>, изображенный на рис. 8.2, видоизменен таким образом, что коллиматор формирует очень узкий пучок света. Воспользуемся таким прибором для оценки зернистости и проведем с его помощью сканирование негативов, используемых в нашем примере. Так как диаметр пучка света очень мал, количество света, достигающего фотометра, будет изменяться в зависимости от степени его рассеяния и поглощения. При этом с помощью регистрирующего прибора получают некую кривую, характеризующую изменение оптической плотности как функцию координат точки. На рис. 8.25 показаны примеры этих кривых для негативов с низкой (кривая 1) и высокой (кривая 2) плотностью. Затем определяют плотность и стандартное отклонение от среднего значения  $\sigma$  (мера флюктуации). Величины флюктуации зависят от диаметра сканирующего луча. Известно, что если этот диаметр не меньше 10 диаметров зерна, то  $\sigma$  обратно пропорционально квадратному корню из площади апертуры луча  $a$ .

"Например, если вместо глянцевой фотобумаги использовать матовую или тисненную бумагу. — Прим. перев.<sup>2)</sup> Прибор для определения оптической плотности. — Прим. перев.

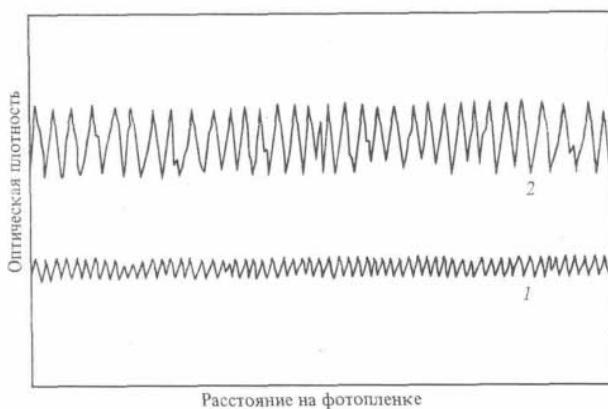
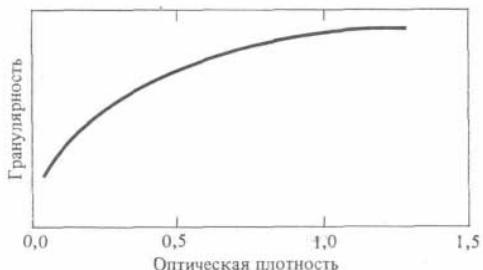


Рис. 8.25.

Микроденситометрические кривые фотопленок с низкой (1) и высокой (2) оптической плотностью.

Поэтому обычно в выражение, определяющее величину гранулярности  $G$ , вводят корректирующий множитель, так что  $C = \sigma/\sqrt{2a}$ . (8.9) На рис. 8.26 представлена зависимость гранулярности от оптической плотности для типичной фотопленки. Отметим, что гранулярность монотонно возрастает с увеличением оптической плотности. Отличие от случая зернистости, которая уменьшается с возрастанием оптической плотности, объясняется способом определения величины  $G$  и (или) способом ее измерения.

Поскольку зернистость увеличенного фотоснимка в основном определяется зернистостью негатива, следует попытаться довести до минимума гранулярность негатива. Наиболее очевидным способом уменьшения зернистости фотоотпечатка является использование негатива с меньшей оптической плотностью. В этом еще одна причина использования начального участка характеристической кривой<sup>1)</sup>.



" См. разд. «Светочувствительность фотопленок». — Прим. перев.  
Рис. 8.26.

Зависимость гранулярности от оптической плотности для типичной черно-белой фотопленки.

Использованием диффузного фотоувеличителя также можно уменьшить зернистость отпечатка, но ценой ухудшения резкости изображения. Влияние зернистости негатива также можно уменьшить путем снижения его контрастности, так как высокая контрастность негатива усиливает впечатление зернистости отпечатка. Как уже отмечалось, зернистость наиболее заметна в диапазоне средних тонов, и, поскольку зритель воспринимает зернистость главным образом на больших участках снимка с одинаковой оптической плотностью, впечатление зернистости может быть уменьшено, если при фотографировании стараться включать в кадр меньше таких участков. Однако такой путь уменьшения зернистости весьма сложен и может приводить к искажению художественного замысла.

Вопросам снижения зернистости путем использования мелкозернистых проявителей, особенно для 35-мм формата, в литературе уделено значительное внимание. Уменьшения размеров отдельных зерен в процессе проявления можно достичь с помощью их частичного проявления. Большинство проявителей, используемых для малоформатных пленок, предназначено для такого

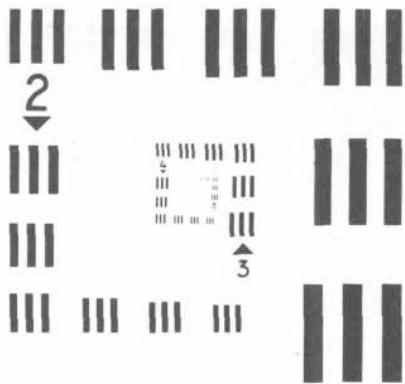
проявления. У некоторых проявителей, например Kodak D-76, этот эффект достигается благодаря их низкой активности. В результате происходит частичное проявление зерен, а оставшиеся зерна растворяются в процессе фиксирования. Проявители другого типа содержат соединения, способные растворять галогениды серебра, поэтому процессы проявления и растворения зерен протекают параллельно. Этот тип проявителей относится к мелкозернистым проявителям, поскольку даже при длительном проявлении размеры зерен будут малы при условии, однако, что не протекает физического проявления в растворе (гл. 7). В примере, приведенном выше, размеры зерен определялись в основном временем проявления. Мелкозернистые проявители приводят к уменьшению оптической плотности негатива при неизменной экспозиции, что фактически означает уменьшение светочувствительности фотопленки. Поэтому первым шагом на пути уменьшения зернистости негатива является использование малоочувствительных фотопленок.

### **Воспроизведение деталей**

В предыдущем разделе рассматривались проблемы зернистости отпечатка и воспроизведения тонов. Остановимся на характеристиках фотоматериалов, относящихся к воспроизведению деталей: *разрешающей способности, резкости, остроты и частотно-контрастной характеристики*. Для определения разрешающей способности фотопленки изготавливают фотоснимок специальной тест-карты, например такой, как на рис. 8.27<sup>1)</sup>). Каждый набор штрихов характеризуется тем, что

Ч Существует несколько различных типов тест-карт, которые обычно называются мирами. — *Прим. перев.*  
Рис. 8.27.

Типичная тест-карта для определения разрешающей способности пленки (мира). Воспроизводится с разрешения фирмы Eastman Kodak.



ширина штрихов равна расстоянию между ними. Штрих вместе с ближайшим интервалом называется *линейной парой*. Размеры каждого набора штрихов отличаются от соседнего на определенную постоянную величину. Полученный фотоотпечаток миры исследуется с помощью микроскопа для определения той группы штрихов, в которой они еще различаются, и для нахождения расстояния между штрихами. Разрешающая способность определяется как величина, обратная этому расстоянию, и обычно равняется числу линейных пар на миллиметр, или, что более привычно, числу штрихов на миллиметр. Отметим, что разрешающая способность — это субъективная величина, поскольку она

определяется каждым наблюдателем по-своему. В действительности разрешающая способность системы зависит от качества оптических систем (фотоаппарата и микроскопа), миры (контрастность и резкость штрихов), экспозиции и способа проявления.

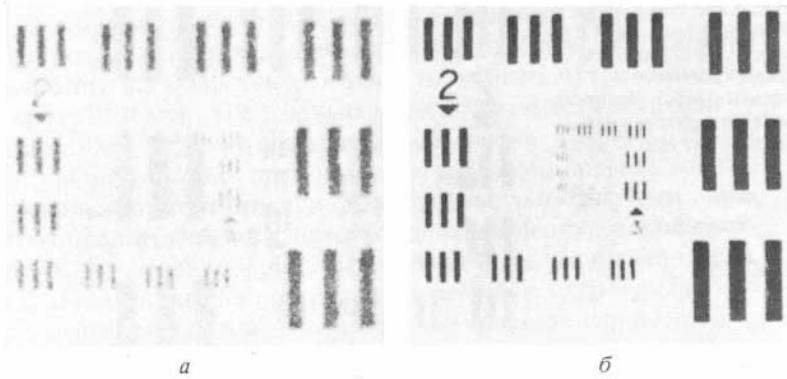
Разрешающая способность значительно ухудшается для больших и малых экспозиций. Поэтому разрешающую способность обычно оценивают для промежуточных (оптимальных) экспозиций. Разрешение обычно уменьшается в два-три раза при уменьшении контрастности миры, поэтому его часто определяют для низко- и высококонтрастных мири. Разрешающая способность оптики  $R_0$  может быть определена независимо от фотопленки с помощью микроскопа, через который рассматривают изображение миры, сформированное объективом фотоаппарата. Если разрешающая способность системы  $R_s$ , измеренная с помощью фотопленки, известна, то для определения разрешающей способности собственно фотопленки можно воспользоваться выражением

$$VRI = V R_F^2 + VRI, \quad (8.10)$$

где  $R_F$  — разрешение фотопленки. Разрешающая способность фотопленок изменяется в пределах от приблизительно 25 линий/мм для низкоконтрастных изображений на высокочувствительных пленках до приблизительно 200 линий/мм для мелкозернистых пленок в условиях высокой контрастности. Разрешающая способность специальных фотопленок может достигать 1000 линий/мм.

Рис. 8.28.

Фотографии миры, полученные с помощью пленок, обладающих низкой (а) и высокой (б) разрешающей способностью (ЭНМ, 1983 г.)



Обычно мелкозернистые низкочувствительные фотопленки обладают высокой разрешающей способностью, а высокочувствительные крупнозернистые пленки — низкой разрешающей способностью.

Кроме размера зерна на разрешающую способность влияют и другие факторы.

Резкость образованного на фотопленке изображения не определяется только разрешающей способностью, а зависит также от самого наблюдателя. На рис. 8.28 представлены фотографии двух мир, полученные на фотопленках типов Kodak 2475 (б) и Kodak 4127 (б). Очевидно, что пленка Kodak 4127 имеет более высокую разрешающую способность, чем Kodak 2475. В действительности фотопленка Kodak 4127 имеет разрешающую способность приблизительно в два раза выше, чем Kodak 2475. На рис. 8.29, а и в показаны фотоснимки карманных часов, полученные с помощью пленки Kodak 2475, на рис. 8.29, б и г — с помощью пленки Kodak 4127 (съемка проводилась в одинаковых условиях). Фотографии б и г более резкие, чем а и в; на них лучше видны различные детали (б), а циферблат кажется более светлым (г). Однако темные детали механизма часов значительно лучше видны на рис. 8.29, а. Кроме того, минутные и секундные штрихи, а также название фирмы (Hamilton) на рис. 8.29, в выглядят более отчетливо. Причины такого явления можно частично понять на основе следующего мысленного эксперимента. Представим себе, что лезвие острого ножа (или бритвы) помещено на каждой из двух фотопленок А к Б, которые затем освещаются параллельным пучком света. После этого фотопленки проявляют и с помощью микроденситометра измеряют оптическую плотность каждой из них как функцию расстояния в направлении, перпендикулярном острию ножа. Если затем построить график зависимости оптической плотности от расстояния, то можно получить кривые, аналогичные показанным на рис. 8.30.

Фотопленка А передает острогу лезвия лучше, чем Б. Резкость изображения края лезвия зависит от размера зерен, толщины фотоэмulsionии и ее светорассеивающих характеристик и может быть представлена количественно. Пленка, дающая резкое изображение лезвия, называется пленкой высокой остроты<sup>1)</sup>.

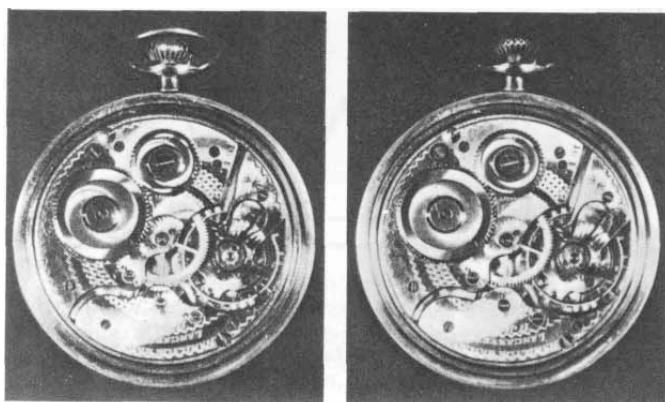


Рис. 8.29.

Фотографии, полученные с помощью тех же фотопленок, что и в случае рис. 8.28 (ЭНМ, 1983 г.).

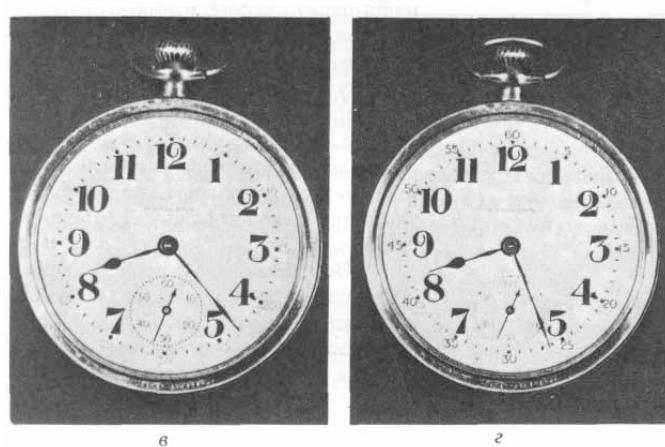
Пленка, дающая нечеткое изображение лезвия, называется пленкой низкой остроты. Может показаться, что мелкозернистые пленки, которые обычно обладают более высокой разрешающей способностью, должны также давать большую остроту. Это не всегда справедливо, как, например, в случаях, изображенных на рис. 8.28 и 8.29: пленка, используемая для получения снимка на рис. 8.29, а и в, имеет более высокую остроту, чем в случаях б и г. Другими словами, не удается установить общую связь между остротой и разрешающей способностью.

1) Математически острота  $a$  для пленки А задают формулой

$$= \frac{1}{ft} \text{ ЛП}_2^a (x_2 - x_1) (D_2 - D)^a dx$$

Рис. 8.30.

Изменение оптической плотности на фотографиях лезвия бритвы, полученные с помощью различных пленок А и Б



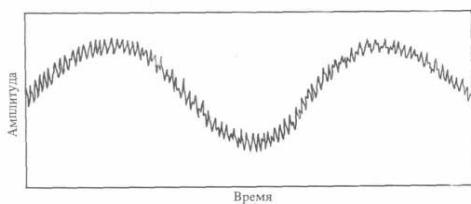
## Частотно-контрастная характеристика

Самым совершенным методом анализа регистрирующей способности фотопленки является определение ее частотно-контрастной характеристики (ЧКХ).

Метод определения ЧКХ напоминает методы, используемые при определении качества воспроизведения акустических сигналов электронными усиливающими системами высшего класса (hi-fi-системами). В hi-fi-систему подают синусоидальные электрические сигналы различных частот и на выходе измеряют сигналы, ею воспроизведенные. Кривую, показывающую относительную способность системы воспроизводить синусоидальные сигналы как функцию частоты, называют кривой частотного отклика. Возникает вопрос: зачем нужна эта характеристика при анализе системы? Вспомним гл. 4, где рассматривалось волновое движение. В ней говорилось, что волны можно представить графически построением амплитуды волны в любой точке пространства как функции времени (см. рис. 4.7, на котором представлена простая синусоидальная волна). Любой звук, каким бы сложным он ни был в принципе, можно представить в виде совокупности простых синусоидальных волн. Чем сложнее звук, тем шире область частот, необходимых для адекватного представления первоначального сигнала.

Следовательно, о качестве передачи усиливающей системой синусоидальных волн можно судить по воспроизведению ею более сложных сигналов. Факт разложения электрических сигналов на простейшие синусоидальные волны находит аналоги в акустике, поскольку музыкальная гамма состоит из простейших звуков, каждый из которых представляет собой синусоидальное колебание. Если более сложную волну (например, звуки, издаваемые симфоническим оркестром) представить аналогичным образом, то получится картина, показанная на рис. 8.31.

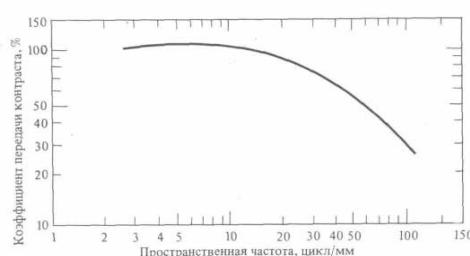
Сканируя снимок и измеряя микроденситометром оптическую плотность как функцию расстояния вдоль него, можно получить график, аналогичный представленному на рис. 8.31, за исключением того, что по оси абсцисс вместо времени измеряется расстояние.



способности (рис. 8.27), за исключением того, что очертания штрихов размыты. Частота пространственных изменений оптической плотности измеряется в единицах цикл/мм, что соответствует единицам линия/мм для миры, определяющих разрешающую способность. Специальную миру фотографируют и с помощью микроденситометра получают кривую изменения оптической плотности фотопленки, которую затем сравнивают с кривой изменения оптической плотности исходной миры. Отношение полученной оптической плотности и начальной называется частотно-контрастной характеристикой и обычно измеряется в процентах. График ЧКХ для типичной пленки представлен на рис. 8.32.

Отметим, что ЧКХ достигает 100% при низких частотах вследствие определенных эффектов проявления. В представленном кратком описании не рассматриваются некоторые важные вопросы, такие, как проблема нелинейности пленки, проблема изготовления качественной миры, а также детали метода, позволяющего избежать влияния контрастности пленки на результаты измерений. По поводу последнего вопроса надо сказать, что характеристическая кривая фотопленки используется для демодуляции ее измеренной оптической плотности.

Рис. 8.32.



Частотно-контрастная характеристика черно-белой фотопленки Kodak Plus-X Pan.

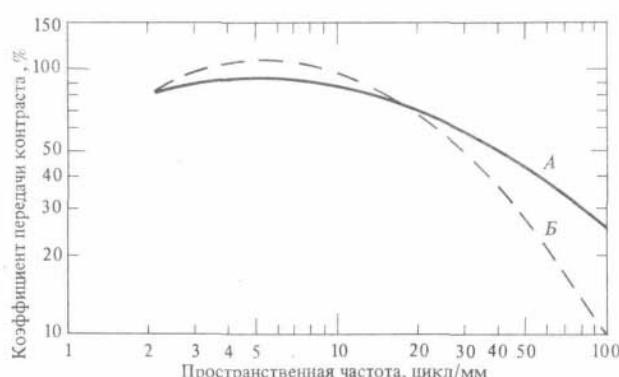


Рис. 8.33.

Частотно-контрастные характеристики объектива (A) и фотопленки Kodak Plus-X Pan (B), экспонированной с помощью этого объектива.

Так же, как и в случае нахождения общей разрешающей способности оптической системы и фотопленки, можно получить общую ЧКХ, зная в отдельности ЧКХ фотопленки и оптической системы для данной частоты. Общая ЧКХ будет равна произведению двух известных ЧКХ.

**Пример 8.9.** На рис. 8.32 представлена ЧКХ

для фотопленки Kodak Plus-X Pan, проявленной, обычным способом. На рис. 8.33 показана ЧКХ для хорошего объектива (кривая A). Определить ЧКХ системы, в которой пленка Kodak Plus-X Pan используется совместно с упомянутым объективом, а пленку проявляют в тех же условиях.

Для решения поставленной задачи необходимо перемножить соответствующие значения известных ЧКХ для каждой частоты. Полученный результат представлен в виде кривой B на рис. 8.33.

### Эффекты проявления

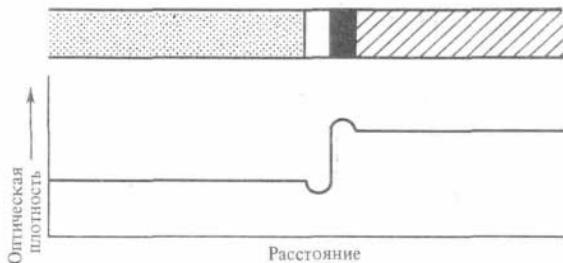
Во время проявления фотопленки имеет место несколько эффектов, которые приводят к уменьшению точности воспроизведения негативом изображения, сформированного объективом. В основном эти эффекты связаны с явлениями диффузии проявителя или его побочных продуктов между сильно экспонированными и минимально экспонированными соседними участками. Одним из них является так называемый *эффект каймы (бордюра)* (один из двух пограничных эффектов). Представим себе ситуацию, когда одна часть пленки равномерно сильно экспонировалась, а другая экспонировалась слабо. Можно ожидать, что после проявления сильно экспонированный участок будет иметь равномерное значительное почернение, а другой — равномерное слабое потемнение (рис. 8.34). На самом деле в приграничном участке сильно экспонированной части фотопленки появляется более темная полоса. Этот эффект объясняется влиянием

неиспользованного проявителя,

Ч Neblette C. B., Fundamentals of Photography, New York: Van Nostrand, Reinhold, 1970, p. 70ff.

Рис. 8.34.

Пограничные эффекты в проявленной фотопленке



диффундирующего из слабо экспонированной области и вызывающего усиление проявления в пограничной области.

В соседней слабо экспонированной области может иметь место еще один пограничный эффект — более светлая полоса рядом с темной (рис. 8.34). Это явление называется *эффектом бахромы* и объясняется влиянием побочных продуктов проявления, образованных в сильно

экспонированной части фотопленки и диффундирующих в слабо экспонированный участок, где они действуют как ингибиторы и приводят к замедлению процесса проявления. Эти две линии иногда называют *линиями Маки*. Если в процессе проявления плоскость фотопленки находится в вертикальном положении, то побочные продукты проявления, диффундирующие в слое фотоэмulsionии из сильно проявленных участков, могут привести к образованию полос в негативе. Этого эффекта можно избежать систематическим перемешиванием раствора в течение проявления.

Если пленку освещать круглыми пучками света различного диаметра, но с одинаковой освещенностью, то в проявленной пленке оптическая плотность маленьких пятен будет увеличиваться с уменьшением диаметра пятна. Это явление называется *эффектом Эбергардта* и объясняется теми же процессами, что и пограничные эффекты. Неизрасходованный проявитель диффундирует параллельно плоскости пленки в более сильно экспонированные участки, усиливая проявление. Этот эффект заметнее для малых пятен. Было обнаружено, что в случае двух малых

пятен, лежащих на фотопленке очень близко друг к другу, соседние части пятен проявляются меньше, чем диаметрально противоположные. Это явление называется *эффектом Костинского* и объясняется конкуренцией соседних областей в процессе проявления при одновременном образовании замедляющих побочных продуктов, которые стремятся ослабить проявление на этих участках.

Большинство рассмотренных эффектов не имеют существенного значения в обычной фотографии, но в научной фотографии могут приводить к значительным проблемам. Например, сффект Костинского приводит к увеличению расстояния между двумя пятнами на фотопленке по сравнению с расстоянием оптических изображений. Если с помощью фотоснимка оценивать относительные положения двух соседних звезд, то измерения будут ошибочными, если не вводить поправки на эффект Костинского.

### **Резкость снимка**

Резкость может быть как требуемой, так и нежелательной характеристикой снимка. Как уже говорилось в гл. 3, некоторые портреты смотрятся лучше, если изображение не слишком резкое. Иногда интенсивное «смазывание» изображения используется для передачи эффекта движения. Рассмотрим основные факторы, определяющие резкость фотографического изображения. Снимок не может быть более резким, чем сам объект, который на нем представлен. Относительное движение фотоаппарата и предмета уменьшает резкость. Самые резкие снимки получаются при условии неподвижности объекта и четкой фиксации фотоаппарата. Вследствие низкой контрастности объекта или мягкого освещения снимок может выглядеть менее резким. Если предмет «не в фокусе», то его изображение не будет резким. Даже сфокусированный объект может быть нерезким, если объектив подвержен значительной аберрации.

Резкое изображение, полученное на фотопленке, может дать резкий негатив, если пленка обладает значительными разрешением и остротью, необходимыми для воспроизведения деталей изображения. Характеристики фотопленки зависят от способа ее обработки. Контрастность пленки и ее разрешающая способность могут заметно меняться в зависимости от способа проявления. И наконец, насколько резким кажется полученный отпечаток, зависит от степени его увеличения и условий, при которых он рассматривается. Если снимок рассматривать издали при плохом освещении, то он может казаться резким, несмотря на имеющуюся нерезкость. С другой стороны, снимок не будет казаться резким при большом увеличении и если он рассматривается слишком близко с точки наилучшего наблюдения при ярком освещении.

### **Упражнения**

1. Сравните контрастность обычной сцены вне помещения в солнечный день с регистрирующей способностью фотобумаги.
2. Почему при обычной фотопечати предпочтение отдают глянцевой фотобумаге, а не матовой?
3. Светорассеяние объектива приводит к дополнительному освещению теней объекта за счет ярко освещенных участков изображения и наоборот. Какие потери света больше всего уменьшают контрастность изображения?
4. Мы говорим о логарифмической природе чувствительности глаза. Если это так, какие изменения имеют место в зрительном ощущении, если освещенность, измеренная прибором, удвоилась?
5. Фотопленка типа А имеет оптическую плотность в два раза большую, чем фотопленка типа Б. Чему равно отношение интенсивностей света, прошедшего через фотопленку Б, и света, прошедшего через фотопленку А?
6. Обычно на экспонированной пленке тональность объекта соответствует начальному участку характеристической кривой. Назовите три причины этого.
7. Используя данные рис. 8.8, определите средний градиент 5 для пленки Kodak Tri-X Pan, проявленной в течение 9 мин в проявителе D-76. Определите показатель контрастности и сравните полученное значение с известным показателем контрастности.
8. Если время проявления пленки Kodak в проявителе D-76, разбавленном в отношении 1:1, увеличить с 8 до 10 мин, то каково увеличение показателя контрастности в процентах?
9. Рассмотрите влияние увеличения времени проявления фотопленки на коэффициент контрастности. Что произойдет с областью оптических плотностей при данной экспозиции, если время проявления увеличить?
- LO. Из данных рис. 8.12 найдите индекс экспозиции для пленок Kodak Tri-X Pan и Kodak Plus-X Pan и сравните полученные значения с номинальной светочувствительностью пленок в единицах ASA.
- L1. Найдите полезный интервал логарифмов экспозиций для фотобумаги номер 2, характеристическая кривая которой представлена на рис. 8.14.

12. Как изменяется полезный интервал логарифмов экспозиций данного типа фотобумаги с увеличением ее номера?
13. Имеются два негатива одного и того же объекта. Первый имеет интервал оптических плотностей 1,1 второй 0,7. С какого негатива необходимо печатать на фотобумаге с более высокой контрастностью?
- L4. Придумайте простой эксперимент, демонстрирующий отклонение от закона взаимозаместимости, используя свой фотоаппарат и обычную черно-белую пленку.
15. Опишите эксперимент, демонстрирующий эффект прерывистого освещения.
16. Как изменяется зернистость с увеличением экспозиции пленки?
- L7. Почему, несмотря на то что большинство проблем зернистости возникает в результате образования зерен в негативе, мы говорим о гранулярности при оценке негатива и о зернистости при оценке фотоснимка<sup>0</sup>

## Глава 9. Определение экспозиции

Для определения правильной экспозиции необходимо знать количество света, отраженного от предмета и попадающего в фотоаппаратуру. Это может быть сделано путем оценки или измерения количества света, падающего на объект или отраженного от него. В гл. 2 в основном обсуждалось применение эмпирического способа определения экспозиции, а также кратко рассматривались вопросы использования экспонометров — устройств, позволяющих измерять отраженный свет. В этой главе будут детально обсуждены различные конструкции экспонометров и способы их применения. Будут также представлены некоторые системы, используемые при определении экспозиции.

### Методы измерений

Исходя из условий освещения (например, яркий солнечный день, легкая облачность и т.д.), можно приблизительно оценить количество света, падающего на объект, и затем по калькулятору вычислить правильную экспозицию. Можно также воспользоваться измерителем падающего света, который даст значение величины освещенности сюжета. Для этого фотограф поворачивается лицом к источникам света и измеряет количество света, достигающего объекта (рис. 9.1). При достаточно равномерной освещенности этот метод обеспечивает определение правильной экспозиции<sup>1</sup>), позволяющей получить удовлетворительный негатив для стандартного способа печати, описанного в последней главе. Но поскольку встроенные в фотоаппарат экспонометры являются измерителями отраженного света и в настоящее время они получили широкое распространение, общепринятым способом определения экспозиции является измерение отраженного света (или измерение по яркости). Для этого используются показания встроенного в фотоаппарат или ручного экспонометра, когда он направлен на объект (рис. 9.2). Показания

экспонометра зависят от освещенности и отражающих свойств поверхностей объектов. Для среднего объекта (который отражает в среднем 18% падающего света) этот способ дает наиболее подходящую («правильную») экспозицию, соответствующую стандартному способу печатания.

<sup>1</sup>) Измерителем „по освещенности“ является и обычный экспонометр с надетой на окошко фотоприемника рассеивающей насадкой (матовым или молочным стеклом). — Прим. ред.

Рис. 9.1.

Способ измерения экспонометром интенсивности падающего света (по освещенности)



Преимущества и недостатки обоих методов будут обсуждены позже.

### Экспонометры

Большинство ручных экспонометров сконструировано для измерения как падающего, так и отраженного света. Полупрозрачный колпак (рис. 9.3), закрывающий светочувствительный элемент и используемый для измерения падающего света, может быть сдвинут и удален при измерении отраженного света. Так как для измерения падающего и отраженного света используют один и тот же экспонометр, полупрозрачный кол-



**Рис. 9.2.** Способ измерения экспонометром интенсивности отраженного света (по яркости)

**Рис. 9.3.**

Общий вид типичного ручного экспонометра (ЭНМ, 1983 г.).



пак должен поглощать около 80% падающего света. Большинство экспонометров имеет в качестве светочувствительного элемента фоторезистор, сопротивление которого уменьшается с ростом интенсивности падающего на него света. Электрическая цепь такого экспонометра схематически изображена на рис. 9.4, а. С уменьшением сопротивления цепи стрелка регистрирующего устройства (гальванометра) отклоняется на больший угол, поскольку напряжение источника тока остается постоянным.

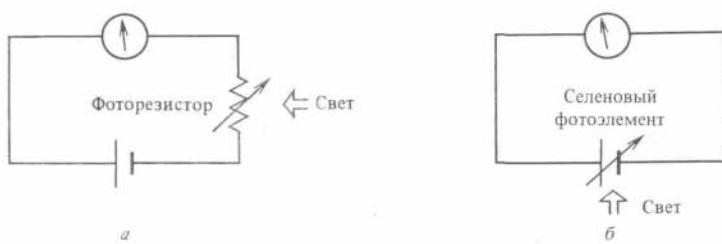
В некоторых экспонометрах вместо стрелочного гальванометра применяют цифровой способ вывода данных. До недавнего времени фоторезисторы изготавливались из сульфида кадмия или некоторых его модификаций. Теперь все большее применение находят модифицированные формы арсенида галлия или кремния. Изготовленные из этих материалов фоторезисторы обладают практически линейной характеристикой при измерении большей части электромагнитного спектра и меньшим временем реагирования на изменение освещенности. Большинство встроенных в фотоаппарат экспонометров, которые сконструированы на основе этих фоторезисторов, работают аналогично отдельным «ручным» экспонометрам, за исключением того, что они могут измерять только яркость объектов.

В некоторых прежних типах ручных и встроенных экспонометров в качестве светочувствительного элемента применяли селеновый фотоэлемент, который устроен таким образом, что генерируемая фото-ЭДС увеличивается с ростом освещенности и в результате увеличиваются показания гальванометра (рис. 9.4, б). Такой тип экспонометра не нуждается в дополнительном источнике тока, но существенно менее чувствителен к свету и, следовательно, не может использоваться при низких уровнях освещенности, детектируемых экспонометром с фоторезистором.

**Рис. 9.4.**

Схемы электрических цепей экспонометров на основе фоторезистора (а) и селенового фотоэлемента (б).

Обычно экспонометры снабжают механическим калькулятором (рис. 9.3) для определения факторов экспозиции. Как только с помощью экспонометра измерен световой



уровень, соответствующая экспозиция определяется путем установки калькулятора с учетом светочувствительности фотопленки. Большинство встроенных в фотоаппарат экспонометров снабжено «нулевым» индикатором. Для определения экспозиции с помощью такого устройства достаточно совместить стрелку экспонометра, связанную с диафрагмой и (или) с головкой установки выдержки, с «нулевым» индикатором. В этот экспонометр также заранее вводят величину светочувствительности используемой фотопленки. Некоторые ручные экспонометры также снабжают «нулевыми» индикаторами, работающими по аналогичному принципу.

**Пример 9.1.** При фотографировании небольшой группы людей в умеренно освещенной комнате для определения экспозиции используется экспонометр с измерением падающего света. Пленка

имеет светочувствительность 400 единиц ASA. Показание экспонометра соответствует 11. Найти правильную экспозицию для этих условий. Калькулятор настроен на чувствительность пленки 400 единиц ASA.

Устанавливаем цифру 11 против отметки калькулятора. Полный набор соответствующих экспозиций считываем с верхних шкал калькулятора [относительное отверстие диафрагмы, выдержка (с)]: 1:2, 1/250; 1:2,8, 1/125; 1:4, 1/60; 1:5,6, 1/30. Для съемки небольшой группы людей, чтобы получить достаточную глубину резкости и избежать случайной смазки при движении кого-нибудь из фотографируемых, следует выбрать экспозицию 1/4, 1/60 с. При наличии движения людей более приемлемой эквивалентной экспозицией может быть 1:2, 1/250 с.

*Точечный экспонометр (спотметр)* — специальный тип экспонометра отраженного света, который может быть использован для измерения яркости очень малых участков объекта.

Фотограф направляет прибор на объект, наблюдая его через оптический видоискатель с углом зрения около 20°. Обычно чувствительный элемент такого экспонометра обладает углом восприятия 1°, расположен в центре видоискателя и обозначается кружком в середине наблюдаемого поля. Стрелочный или цифровой индикатор также расположен в поле зрения видоискателя для того, чтобы можно было исследовать весь объект поточечно, определяя яркости различных участков. Экспозиции определяются с помощью калькулятора, напоминающего изображенный на рис. 9.3. Некоторые экспонометры бывают снабжены адаптером, позволяющим использовать их и в качестве точечного экспонометра. Для этого угол зрения экспонометра уменьшают от обычного значения приблизительно

30° до такого, которое сравнимо с углом восприятия точечного экспонометра.

Экспонометры отраженного света, встроенные в фотоаппарат, используются для контроля всего поля зрения фотоаппарата. Однако некоторые из этих экспонометров имеют зону чувствительности, чтобы в основном регистрировать свет, отраженный от центральной части кадра. И лишь немногие фотоаппараты снабжают встроенным точечным экспонометром.

Большинство из них может работать и в точечном, и в обычном усредненном режиме.

Шкалы некоторых экспонометров маркированы в единицах EV, которые соответствуют определенным значениям факторов экспозиции. Эти шкалы логарифмические, и показания между двумя соседними метками изменяются в два раза (на одну ступень). Нуль EV-шкалы соответствует относительному отверстию 1:1,0 при выдержке 1 с или эквивалентным значениям экспозиции.

#### **Определение экспозиции для объектов, обладающих средней отражательной способностью**

*Отражательная способность R* объекта показывает, какая часть падающего света отразилась от его поверхности. Отражательную способность, выраженную в процентах, называют *коэффициентом отражения*. В этом параграфе будут рассмотрены различные методы определения экспозиций сюжетов, чья отражательная способность равна значению, которое принимается за среднее 0,18. Желательно, чтобы получаемые фотоснимки имели такое распределение тонов, как на рис. 8.17. В качестве примера можно рассмотреть объект вне помещения, у которого средние тона распределены равномерно, а света и тени сжаты и для которого необходима стандартная процедура печатания.

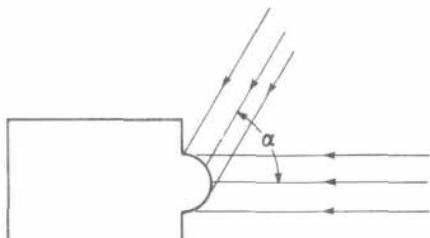
Если освещение относительно однородное, можно применить экспонометр для измерения падающего света с целью определения оптимальных факторов экспозиции. Если источник света обеспечивает рассеянное освещение, как, например, при освещении объекта вне помещения светом неба в пасмурный день, то могут проводиться прямые измерения: для этого экспонометр наводят на источник света снимаемого объекта и определяют экспозицию по калькулятору.

В литературе много внимания уделяется вопросу об ориентации экспонометра, если основное освещение создается одним точечным источником (например, солнцем в ясный день). Иногда рекомендуется наводить экспонометр посередине между солнцем и фотоаппаратом в случае сюжета, освещаемого спереди. Причину такой рекомендации можно понять из рис. 9.5. Если экспонометр направлен под углом α относительно достаточно удаленного точечного источника (например, солнца), то часть полусферического окна светоприемника будет затенена, и поэтому поперечное сечение пучка света, попавшего в экспонометр, уменьшается.

Рис. 9.5.

Падение света на полусферическое окно светоприемника по нормали и под углом.

Можно показать, что для идеальной рассеивающей полусферы относительная светоприемная способность C для такого источника будет равна



$C=(1+\cos a)/2$ . (9.1) Если угол  $a$  равен нулю (нормальное падение), то  $C=1$ . Если  $a = 90^\circ$ , то  $C=0,5$ . При угле падения света  $45^\circ$  относительная светоприемная способность составляет 0,85. Если объект освещается сбоку или сверху и экспонометр направлен на фотоаппарат ( $a = 90^\circ$ ), то будет измерена только половина света, излучаемого точечным источником. Это может приводить к передержке ярко освещенных участков. Такое освещение обычно приводит к частичному затенению объектов, и поэтому во многих случаях оказывается необходимым некоторое увеличение экспозиции. Вот почему обычно рекомендуют направлять экспонометр по середине между источником света и фотоаппаратом. Во многих освещенных фронтальным светом сюжетах указанной коррекцией можно пренебречь, а экспонометр направлять к фотоаппарату, поскольку даже для  $a = 45^\circ$  коррекция составляет только 15%. Некоторые специальные экспонометры снабжаются плоским полупрозрачным светоприемным окном. Относительная светоприемная способность этого типа экспонометров в случае удаленного точечного источника составляет

$$C=\cos a. \quad (9.2)$$

На практике редко встречается ситуация, когда освещение объекта обеспечивается одним точечным источником. Так, в ясный день вне помещения предметы получают непосредственно от солнца не более 90% освещения; оставшуюся часть освещения они получают в виде света, рассеянного от неба и от близлежащих отражающих поверхностей. Например, объект, расположенный на белом бетоне, в ясный день получает приблизительно половину освещения за счет отражения света от поверхности бетона. Это согласуется с эмпирическим правилом, согласно которому для объекта, находящегося на песке или на снегу, диафрагма должна быть уменьшена на одну ступень.

Определение правильной экспозиции в случае контрового освещения объектов<sup>11</sup> может быть весьма трудным. Так,

<sup>11</sup> Контровым называется освещение источником, находящимся сзади снимаемого объекта. — Прим. перев.  
если фотографируется сюжет, включающий какой-либо предмет, освещенный сверху, то применение экспонометра, измеряющего яркость, может привести к передержке ярко освещенных участков. В связи с этим необходимо уменьшить величину действующего отверстия объектива на 1,5 ступени, чтобы скорректировать передержку. С другой стороны, при фотографировании предмета крупным планом в контровом свете в определяемую экспозицию необходимо вводить лишь незначительную корректировку. Когда имеется приблизительно равномерная освещенность объекта, экспонометры по освещенности работают хорошо и не требуют значительной коррекции. Следует помнить, что в этом случае экспонометр измеряет весь падающий на него свет. Можно также пожелать фотографу проводить многочисленные эксперименты с экспонометром, вести подробные записи, оценивать и суммировать конечные результаты.

**Пример 9.2.** Воспользуемся экспонометром для измерения падающего света с полусферической насадкой на светоприемнике для определения экспозиции в случае фотосъемки человека при боковом освещении. Светлые участки должны быть экспонированы нормально, а теневые части лица могут быть без проработки деталей. Если экспонометр для измерения падающего света направляют к фотоаппарату, то экспозиция должна производиться при относительном отверстии 1:11 и выдержке 1/125 с. Какой должна быть скорректированная экспозиция?

Поскольку источник света относительно направления светового измерения находится под углом  $90^\circ$ , то светоприемная способность фотоэкспонометра равна 0,5, и поэтому надо установить факторы экспозиции 1:16 и 1/125 с, чтобы избежать передержки светлых участков объекта. Когда используется экспонометр отраженного света для определения экспозиции при съемке объекта со средней отражательной способностью, освещенного спереди, обычно возникает несколько проблем. Однако большинство объектов не являются «средними». Например, летний пейзаж с богатой зеленью будет казаться средним, так как отражательная способность зелени около 0,20. Яркость неба всегда будет значительно интенсивнее, чем свет, отраженный от зелени. Поэтому, чтобы избежать недодержки зелени, необходимо критически относиться к показаниям экспонометра, на которые будет влиять световой фон. Если источник освещения находится перед фотоаппаратом, как, например, в случае контрового или бокового освещения, весьма важно закрыть экспонометр от воздействия этого источника. Кроме того, коррекция экспозиции может быть необходимой, чтобы избежать передержки ярко освещенных участков.

**Определение экспозиции при съемке объектов с малой или большой отражательной способностью**

Для съемки светлых и темных объектов в случае измерения экспонометром падающего света нет необходимости вводить коррекцию факторов экспозиции, если имеется равномерная

освещенность и применяется стандартный способ печати, что нарушается при экспонометрическом измерении отраженного света.

Как упоминалось выше, экспонометр отраженного света калиброван по 18%-ному серому эталону<sup>1</sup>), отражательная способность которого соответствует отражательной способности среднего сюжета. Если отражательная способность объекта выше 18% и не вносится никакой коррекции, то предмет будет недоэкспонирован. Например, лицо человека со светлой кожей отражает около 35% света; экспонометр не в состоянии «определить», какое лицо фотографируется, и поэтому укажет усредненную экспозицию, соответствующую 18%-ному серому эталону. При использовании стандартного способа печати и проявления лица на фотоснимке будет отражать приблизительно 18% света вместо 35%, и в результате оно будет выглядеть слишком темным. В случае объектов, отражающих больше 18% света, экспонометр будет показывать завышенную освещенность по сравнению с требуемой, в результате экспозиция будет занижена. Если отражательная способность предмета меньше средней, то показания экспонометра приведут к передержке, если не ввести поправок. Начинающие фотографы часто с трудом понимают эту ситуацию. Для пояснения рассмотрим пример фотографирования черного и белого предметов. Если взять показания экспонометра отдельно для каждого предмета, то они могут отличаться до 3V<sub>2</sub> ступеней диафрагмы. Однако хорошо известно, что можно использовать приемлемую общую экспозицию для этих двух предметов.

Если отражательная способность объекта известна, то корректировка полученного экспонометрического отсчета значительно упрощается. В табл. 9.1 перечислены отражательные способности некоторых выбранных тонов и представлены значения корректирующих коэффициентов. Эти тона иногда называют *ключевыми (определяющими) тонами*. Чтобы использовать эту систему тонов, измерим один из ключевых тонов экспонометром отраженного света; затем, используя соответствующий коэффициент из таблицы, скорректируем экспозицию. Корректировать можно относительное отверстие диафрагмы или время экспонирования. Если один и тот же тон измеряется неоднократно в данной фотографической ситуации, то можно с самого начала скорректировать установку калькулятора экспонометра на «новую» светочувствительность фотопленки. Коэффициент такой корректировки указан в последнем столбце

<sup>1)</sup> В СССР эталоны такого типа выпускаются только для фотографов-профессионалов. — Прим. перев.

| Ключевые тона | Отражательная способность | Корректирующие коэффициенты <sup>a)</sup> |                   | Установка экспонометра в единицах ASA |
|---------------|---------------------------|---|-------------------|---------------------------------------|
|               |                           | диафрагма                                 | выдержка          |                                       |
| Белый         | 0,90                      | +2 <sup>1/2</sup>                         | ×5                | /5                                    |
| Тона кожи     | ладонь руки               | 0,35                                      | +1                | ×2 /2                                 |
|               | светлая                   | 0,35                                      | +1                | ×2 /2                                 |
| Тона кожи     | оливковая                 | 0,30                                      | +1                | ×2 /2                                 |
|               | светло-коричневая         | 0,25                                      | +2 <sup>2/3</sup> | ×1,4 /1,4                             |
| Серый         | коричневая                | 0,18                                      | 0                 | ×1 ×1                                 |
|               |                           | 0,18                                      | 0                 | ×1 ×1                                 |
| Тона кожи     | темно-коричневая          | 0,12                                      | -1 <sup>1/3</sup> | ×0,7 ×1,5                             |
|               | черная                    | 0,06                                      | -1 <sup>1/3</sup> | ×0,3 ×3                               |
| Черный        | очень черная              | 0,035                                     | -2 <sup>1/2</sup> | ×0,2 ×5                               |
|               |                           | 0,032                                     | -2 <sup>1/2</sup> | ×0,2 ×5                               |

<sup>a)</sup> Величины коэффициентов приведены с точностью ± 1/3 ступени диафрагмы.

**Таблица 9.1. Корректирующие коэффициенты ключевых тонов**

табл. 9.1. Система ключевых тонов может быть использована с любыми экспонометрами отраженного света, хотя использование точечных экспонометров предпочтительнее, поскольку они позволяют более точно определять экспозицию небольших участков. Применение ручного или встроенного в фотоаппарат экспонометра требует тщательного заполнения поля зрения экспонометра лишь одним выбранным тоном. В табл. 9.1 включены тона кожи, поскольку часто

одновременно фотографируются несколько людей и точная передача их лиц обычно весьма важна. Белый, серый и черный тона легко доступны и являются хорошими опорными (опорными) точками. Вместо стандартных белого и серого эталонов весьма удобно использовать чистый белый платок. Кроме того, очень удобно пользоваться для определения правильной экспозиции тыльной стороной кисти руки.

**Пример 9.3.** Во время путешествия по Юкатану фотографируют руины архитектурных памятников народа Майя на пленку чувствительностью 125 единиц ASA. Экспозиция определяется с помощью чистого белого платка. При установке калькулятора на чувствительность пленки найденные значения факторов экспозиции составляют 1:14 и 1/500 с. Какие факторы экспозиции необходимо использовать при фотографировании? На какую чувствительность должен быть установлен калькулятор, чтобы его показания давали правильные без исправлений значения факторов экспозиции в случае фотографирования других памятников?

Отражательная способность платка приблизительно равна 0,9; следовательно, необходимо прикрыть диафрагму объектива на 2'Л ступени, что будет соответствовать факторам экспозиции 1:5,6 и 1/500 с. Чтобы получить большую глубину резко изображаемого пространства, надо закрыть объектив на 2 ступени диафрагмы и увеличить время экспонирования в четыре раза (1:11, 1/125 с). Чтобы можно было пользоваться прямыми показаниями калькулятора экспонометра, необходимо установить его на чувствительность пленки  $125/5 = 25$  единиц ASA.

Поправочный коэффициент для любого другого ключевого тона может быть определен при использовании либо 18%-ного серого эталона, либо «стандартного» источника света. В качестве удобного «стандартного» источника можно принять освещение на натуре в яркий солнечный день. Сначала определяют показание экспонометра или выбранного ключевого тона, затем калькулятор приводят в соответствие с отклонением стрелки и вращением диска, устанавливающего светочувствительность фотопленки; далее определяют факторы экспозиции, равные 1:16 и 1/ASA с или значения, эквивалентные им. Теперь экспонометр может быть использован для измерения этого выбранного ключевого тона при любых световых условиях, но для той же фотопленки. Отражательная способность стандартного эталона R равна<sup>1</sup>,

$$R = 0,18 \text{ ASA}/(9,3)$$

где ASA — светочувствительность фотопленки в единицах ASA, 7 — установленное значение на калькуляторе единиц ASA.

Чтобы откалибровать неизвестный ключевой тон с помощью 18%-ного серого эталона, вначале надо определить (для используемой фотопленки) измеренные факторы экспозиции по отношению к серому эталону. Затем надо измерить экспонометром яркость неизвестной поверхности при неизменных световых условиях. После этого калькулятор настраивается в соответствии с найденным экспонометрическим отсчетом и вращением диска, устанавливающим светочувствительность фотопленки в единицах ASA, выставляют на калькуляторе экспозицию, соответствующую найденной экспозиции для серого эталона. Отражательная способность неизвестного ключевого тона может быть определена из равенства (9.3).

Следует с осторожностью использовать экспонометры отраженного света при определении факторов экспозиции для окрашенных объектов. Желтый цвет имеет самую высокую отражательную способность (до 0,75), а фиолетовый — самую

" Поскольку принятая в СССР система измерения светочувствительности в единицах ГОСТ близка к системе ASA, можно пользоваться формулой (9.3) и экспонометрами, выпускавшими в СССР и калиброванными в единицах DIN и ГОСТ, не вводя никаких поправок. — Прим. перев.

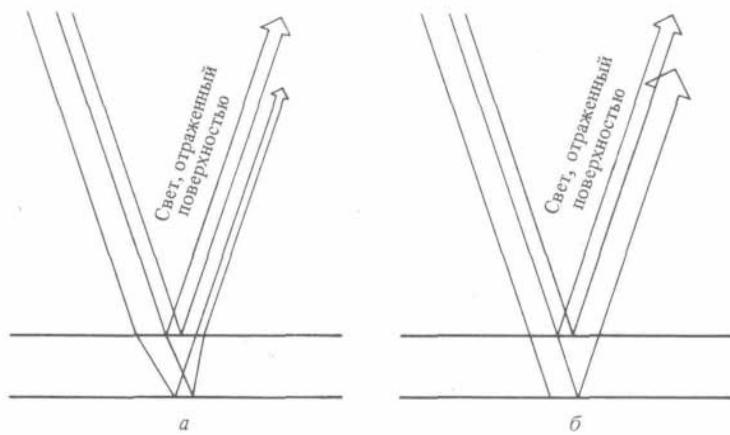
низкую (до 0,06). Практически невозможно перечислить значения отражательных способностей всех цветов, поскольку отражательная способность зависит от цветовых оттенков и от качества красителя, использованного для создания цвета. Например, синий цвет иногда обладает отражательной способностью 0,18, в то время как некоторые темно-синие рубашки — 0,12, а светло-голубые рубашки — около 0,7. В случае флуоресцирующих красок отражательные способности могут быть даже больше единицы, так как электромагнитное излучение в ультрафиолетовой части спектра переходит в видимый свет, приводя к общему увеличению отраженного света по сравнению с падающим на объект.

**Пример 9.4.** Фотографируется модель, одетая в платье розового цвета. В качестве расчетной яркости выбираем ее платье. Используя 18%-ный серый эталон и экспонометр для измерения отраженного света, получим, что при ярком освещении оптимальными факторами экспозиции для пленки Kodak Ektachrom 160 (ASA 160) являются 1:1,4 и 1/60 с. Экспонометрический расчет по серому эталону соответствует 6'А, и 7V<sub>3</sub> (на ступень выше) по платью, освещенному тем же светом. Как нужно настроить калькулятор (установить экспозиционный индекс), чтобы можно было определять оптимальную экспозицию в случае, если экспонометр направлен на платье при меняющихся освещении и яркости?

Настроим калькулятор на значение 7V<sub>3</sub>. Отрегулируем установку единиц ASA так, чтобы факторы экспозиции были равны 1:1,4 и 1/60 с. Теперь экспонометр можно применять, как требуется. При этом указатель ASA будет показывать 80 единиц, и, таким образом, отражательная способность платья розового цвета будет составлять  $R = Q \cdot 18-160/80 = 0,36$ .

Приведенный метод ключевого тона вместе со стандартным способом проявления и печатания позволяет получить снимки, распределение тональностей которых будет таким же, как на рис. 8.1, т.е. света и тени будут сжаты. Например, если фотографируется темное лицо и при этом используется поправка, взятая из табл. 9.1, то на фотографии черты лица будут едва различимы. Так как обычно это неприемлемо, необходимо увеличить экспозицию. Один из путей сделать это — принять за ключевой тон не очень черной кожи тон просто темной кожи (табл. 9.1).

Использование в качестве отправных тонов темных ключевых тонов, и в особенности черного, сопряжено со значительными трудностями. При падении света на поверхность часть света отражается, а другая часть проходит сквозь поверхность (рис. 9.6). Обычно краситель находится на поверхности тела. Свет, который достигает черного красителя, будет поглощаться. Однако всегда некоторая часть света отражается от поверхности, и ее величина зависит от природы поверхности. Количество света, отраженного от белой поверхности, можно сравни-

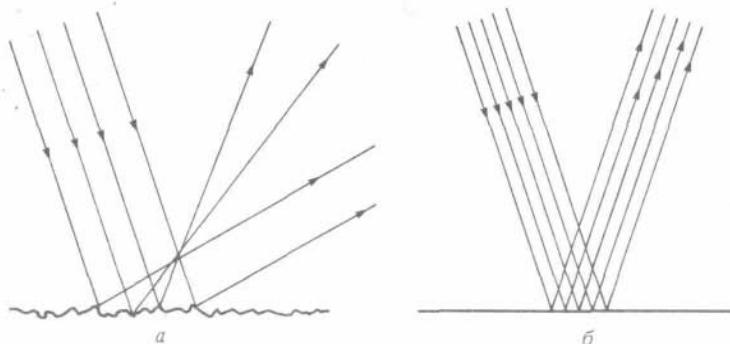


**Рис. 9.6.**  
Отражение света от черной (а) и белой (б) поверхностей.

вать с количеством света, отраженного от черной, если фактуры обеих поверхностей идентичны. Однако белый краситель поглощает очень мало света, а черный поглощает большую часть падающего света. Поэтому основную часть света, отраженного от тела черного цвета, представляет собой свет, отраженный от поверхности. В том случае, если от поверхности объекта белого цвета отражается

такое же количество света, как и от объекта черного цвета, вклад отраженного света весьма мал. Эта ситуация схематично представлена на рис. 9.6 относительной шириной стрелок, представляющих световые лучи. Если поверхности отражают диффузно, то отраженный свет не создает трудностей, поскольку отражается во всех направлениях (рис. 9.7), а измерение экспонометром проводится только в одном направлении. К сожалению, большинство поверхностей до некоторой степени являются зеркальными, и предметы бликуют. Следовательно, наблюдаемая «чернота» черного объекта зависит не только от того, насколько он «черен», но и от направления наблюдения, особенно при освещении точечным источником света. Таким образом, чтобы получить истинно черный цвет, необходимо, чтобы поверхность отражала предельно мало света и, кроме того, отражала его диффузно.

Для фотоматериалов, непосредственно дающих позитив-



**РИС. 9.7.**  
Диффузное (а) и зеркальное (б) отражения света.  
ное изображение (например, обращаемая фотопленка), определение экспозиции необходимо проводить очень тщательно, особенно если объект обладает большим диапазоном яркостей. Поскольку регистрирующая способность таких

фотоматериалов заметно нелинейна для диапазона яркости, превышающего пять ступеней экспозиции, света и тени объекта, обладающего большим диапазоном яркостей, будут сильно сжаты. Если в светах и тенях содержится важная информация, то экспозиция, определяемая с помощью метода ключевого

тона, должна быть скорректирована так, чтобы были воспроизведены детали либо в светах, либо в тенях.

Серый эталон может быть использован для определения факторов экспозиции объекта, не обладающего средней отражательной способностью. В этом случае они определяются из экспонометрического отсчета, полученного для карты, расположенной на объекте. При этом эталон должен помещаться параллельно основной поверхности объекта. Также необходимо избегать измерения зеркально отраженного от эталона света, особенно когда используется точечный источник света, такой, как, например, солнце. Когда степень блеска серой стороны сравнима с блеском белой стороны стандартного контрольного эталона, проблема измерения истинной отражательной способности объекта черного цвета становится очень затруднительной.

Если объект не обладает средней отражательной способностью и (или) освещен неравномерно, для определения экспозиции может быть использован способ усреднения. В своей простейшей форме этот способ включает в себя измерение отраженного света от самой яркой и самой темной частей объекта. На основании среднего значения двух измерений и определяется экспозиция. Такие измерения можно проводить точечным экспонометром или экспонометром отраженного света, если его располагать вблизи объекта.

#### **Определение экспозиции для получения необычных фотоснимков**

Весьма часто фотографы для повышения эстетического воздействия обращаются к необычной фотографии. Например, в предыдущем разделе был обсужден вопрос изменения экспозиции для улучшения воспроизведения черт лица чернокожего человека. Чтобы достичь необычного результата, иногда надо изменить экспозицию фотопленки и (или) время проявления либо воспользоваться фотобумагой иной степени контрастности. Рассмотрим основные относительно простые пути изменения экспозиции и (или) времени проявления, а также *зональную систему* с точки зрения характеристических кривых, рассмотренных в предыдущей главе.

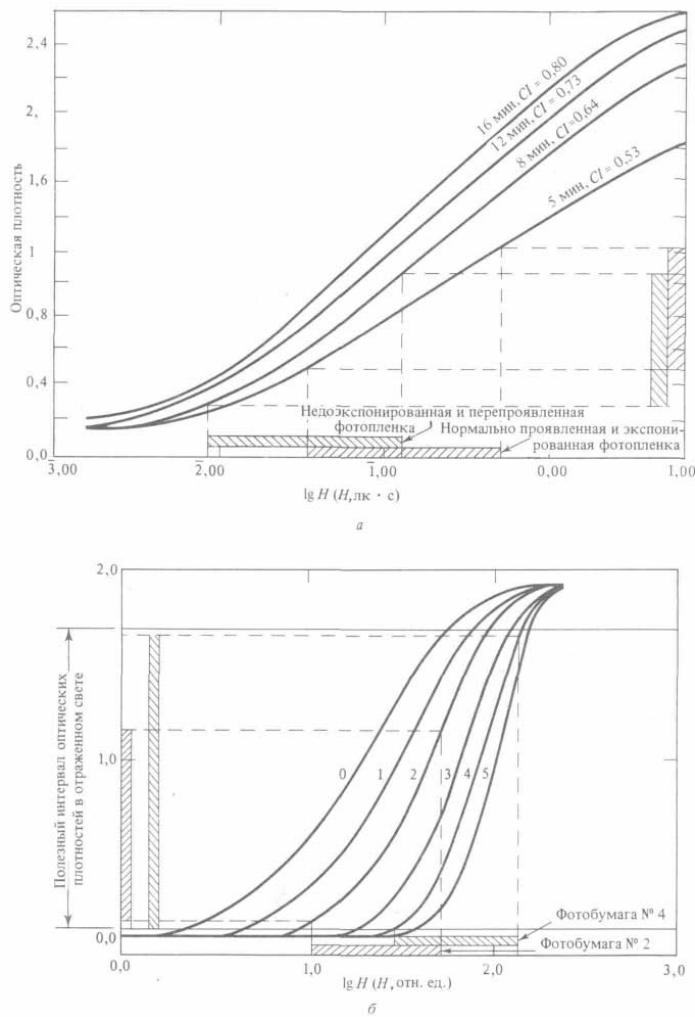
При фотографировании сцены с чрезвычайно низкой или высокой контрастностью может возникнуть необходимость уменьшения экспозиции и (или) времени проявления. Негатив низкоконтрастной сцены (например, морской пейзаж в пасмурный день) при нормальных экспозиции и проявлении имеет ограниченный диапазон оптических плотностей. Если для печати использовать фотобумагу № 2, диапазон тональностей бумаги не будет полностью использован и фотоотпечаток будет *вялый*. Иногда этого эффекта специально добиваются, но чаще всего он нежелателен. Фотография может быть исправлена печатанием на более контрастной фотобумаге, потому что в этом случае требуется меньшая область плотностей негатива для воспроизведения всей области тонов.

**Пример 9.5.** При фотографировании морского пейзажа в пасмурный день воспользуемся фотопленкой типа Kodak Plus-X Pan. Область экспозиций сцены перекрывает четыре ступени (интервал яркостей 16:1). Экспозиция определялась по нескорректированному экспонометрическому отсчету яркости. Проявление проводилось стандартным способом. Контроль негатива показал, что минимально различимые детали воспроизведены на негативе с оптической плотностью, приблизительно в три раза большей плотности основы и вуали. Будет ли фотоотпечаток на фотобумаге № 2 выглядеть вялым? И если да, можно ли воспользоваться фотобумагой с любым другим номером для воспроизведения всей области тонов на снимке?

На рис. 9.8,а представлена характеристическая кривая для фотопленки типа Kodak Plus-X Pan, стандартно проявленной (нижняя кривая). Характеристические кривые для глянцевой фотобумаги с различной контрастностью представлены на рис. 9.8,б. Так как оптическая плотность основы и вуали негатива составляет приблизительно 0,18, то плотность минимально различимых деталей будет 0,54, что соответствует логарифму экспозиции  $-1,5$ . Так как полная область экспозиций охватывает 4 ступени, полезный интервал логарифмов экспозиций равен  $4-0,3 = 1,2$  и соответственно логарифм максимальной экспозиции составляет  $-0,3$ . Этот полезный интервал логарифмов экспозиций показан на рис. 9.8,а. Экспозиция создает максимальную оптическую плотность 1,23, так что интервал оптических плотностей, как показано на рисунке, равен приблизительно 0,7. Если пренебречь влиянием увеличения, этот интервал переходит в полезный интервал логарифмов экспозиций 0,7 фотобумаги. Поскольку полезный интервал логарифмов экспозиций фотобумаги № 2 составляет около 1,1, снимок получится вялым независимо от экспозиции фотобумаги при печати. Использование рассеянного света в фотоувеличителе будет приводить к повышенной вялости снимка. Если фотоснимок напечатан на бумаге № 3 (см. соответствующую кривую на рис. 9.8,б), интервал оптических плотностей отпечатка в отраженном свете составит 1,0, в то время как полезный интервал оптических плотностей этой бумаги имеет значение 1,65. Если же печать с негатива производится на бумаге № 4 (см. рис. 9.8,б), то отпечаток будет иметь почти полный полезный интервал оптических плотностей. Отметим, что в приведенном выше примере негатив имеет большую оптическую плотность, чем необходимо, и в результате теряется преимущество построения изображения в нижней части характеристической кривой (чем меньше экспозиция, тем лучше разделение тонов и меньше зернистость). Если экспозицию

уменьшить без каких-либо других изменений, интервал оптических плотностей негатива еще больше бы уменьшился, что усугубило бы проблему вялого снимка. Если экспозицию уменьшить, а время проявления увеличить, то

может быть получен негатив с большим интервалом оптических плотностей, для которого используется нижняя часть характеристической кривой. **Пример 9.6.** Предположим, что сцена, описанная в примере 9.5, сфотографирована на той же самой пленке, но экспозиция уменьшена на две ступени. Предположим далее, что использован тот же проявитель, но время проявления увеличено на 60%. Каким будет интервал оптической плотности негатива и как его сравнить с полезным интервалом логарифмов экспозиций фотобумаг, представленных на рис. 9.8,67. Если экспозиция уменьшена на две ступени, минимальное значение логарифма экспозиции будет -2,1, а максимальное -0,9. При указанном увеличении времени проявления (8 мин) минимальная оптическая плотность составит 0,32, максимальная 1,08 и интервал оптических плотностей 0,75 (рис. 9.8,а). Таким образом получим, что минимальная и максимальная оптические плотности уменьшились, а интервал оптических плотностей увеличился.



**Рис. 9.8.**  
Характеристические кривые для фотопленки Kodak Plus-X Panfa) и типичной глянцевой фотобумаги (б)

Полученный интервал логарифмов экспозиций для бумаги № 3 (рис. 9.8,6) составляет около 0,85, и, очевидно, мы получим удовлетворительный отпечаток, используя новое сочетание негатива и бумаги. Однако наилучшим вариантом может быть выбор бумаги № 4 с ее более узким полезным интервалом экспозиций. Рассмотренный пример представляет, конечно, экстремальную ситуацию. Если нет возможности использовать точечный экспонометр, наиболее разумно применять экспозицию для вялых сцен, приблизительно на одну ступень меньшую, чем для нормальных, и увеличивать время проявления на 25%. Вялые сцены обычно являются следствием диффузного освещения (например небо, покрытое облаками, открытая тень или яркий день), когда значительная часть света отражается и освещает сцену. Примером последней ситуации, когда легко ошибиться, является фотографирование объекта в яркий солнечный день на снегу. Хотя сцена может казаться контрастной вследствие очень яркого освещения, отраженный от снега свет стремится «размыть» тени и приводит к тому, что снимок кажется вялым.

Высококонтрастная сцена, в которой собой противоположный случай по сравнению с вялой сценой. Интервал экспозиций в этом случае составляет 10 ступеней. Если такую сцену сфотографировать на фотопленку Plus-X Pan и затем проявить ее стандартным способом (рис. 9.8,я), то интервал оптических плотностей будет равен около 1,5. Так как полезный интервал логарифмов экспозиций глянцевой фотобумаги № 1 приблизительно равен 1,2 (рис. 9.8,6), то очевидно, что невозможно изготовить фотоотпечаток с такого негатива, который не является высококонтрастным. В этой ситуации наиболее разумным было бы переэкспонировать фотопленку приблизительно на одну ступень и уменьшить время проявления до 75% нормального времени, чтобы снизить контрастность негатива. Недопроявление уменьшает коэффициент контрастности, в то время

отношение яркостей может достигать 1000:1, представляя собой противоположный случай по сравнению с вялой сценой. Интервал экспозиций в этом случае составляет 10 ступеней. Если такую сцену сфотографировать на фотопленку Plus-X Pan и затем проявить ее стандартным способом (рис. 9.8,я), то интервал оптических плотностей будет равен около 1,5. Так как полезный интервал логарифмов экспозиций глянцевой фотобумаги № 1 приблизительно равен 1,2 (рис. 9.8,6), то очевидно, что невозможно изготовить фотоотпечаток с такого негатива, который не является высококонтрастным. В этой ситуации наиболее разумным было бы переэкспонировать фотопленку приблизительно на одну ступень и уменьшить время проявления до 75% нормального времени, чтобы снизить контрастность негатива. Недопроявление уменьшает коэффициент контрастности, в то время

как переэкспонирование улучшает проработку деталей в тенях. Это можно понять, если представить себе, что характеристическая кривая сместилась вниз, а экспозиция возросла приблизительно на 0,3 логарифмических единицы (рис. 9.8, и). Высококонтрастные сцены обычно возникают вследствие использования направленного освещения. Его типичные примеры — театральное освещение (особенно при сольном исполнении) и освещение вне помещения в яркий солнечный день. Первая из двух названных ситуаций может быть особенно огорчительной, поскольку освещение, будучи контрастным, может быть относительно слабым, поэтому и появляется опасность скорее недо-экспонировать, а не переэкспонировать, как это следовало бы сделать, чтобы улучшить тональность фотоотпечатка. Даже после изменения экспозиции и (или) времени проявления, было бы желательным печатать фотографию на более мягкой бумаге для улучшения тональности изображения.

Фотопленки можно классифицировать как пленки с длинной, средней и короткой областями недодержек в зависимости от формы области недодержек (нижней части) характеристической кривой (рис. 9.9). Отметим, что у пленок с увеличенной областью недодержек изменение наклона характеристической кривой (ее крутизны) при увеличении экспозиции постоянно, в то время как для пленки с короткой областью недодержек наклон изменяется более резко. Пленки с увеличенной областью недодержек лучше подходят для высококонтрастных условий освещения (источники направленного света), в то время как пленки с короткой областью недодержек работают лучше при диффузном освещении.

Существует старое правило, определяющее время экспонирования «по теням» и время проявления «по светам». Другими словами, время экспонирования должно быть достаточно длительным, чтобы выявить неразличимые детали в тенях, и проявление достаточно коротким, чтобы сохранить детали в светах. Этим правилом практически невозможно воспользоваться

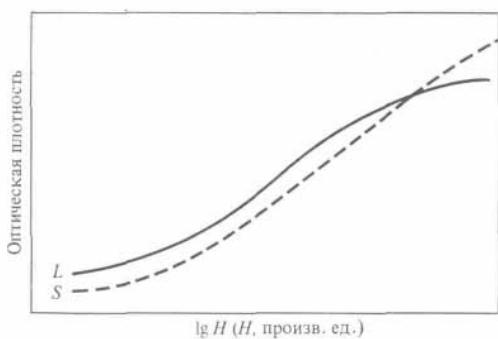


Рис. 9.9.

Характеристические кривые фотопленок с короткой (*S*) и длинной (*L*) областями недодержек

в случае панхроматической фотопленки, поскольку нельзя наблюдать за пленкой во время ее проявления.

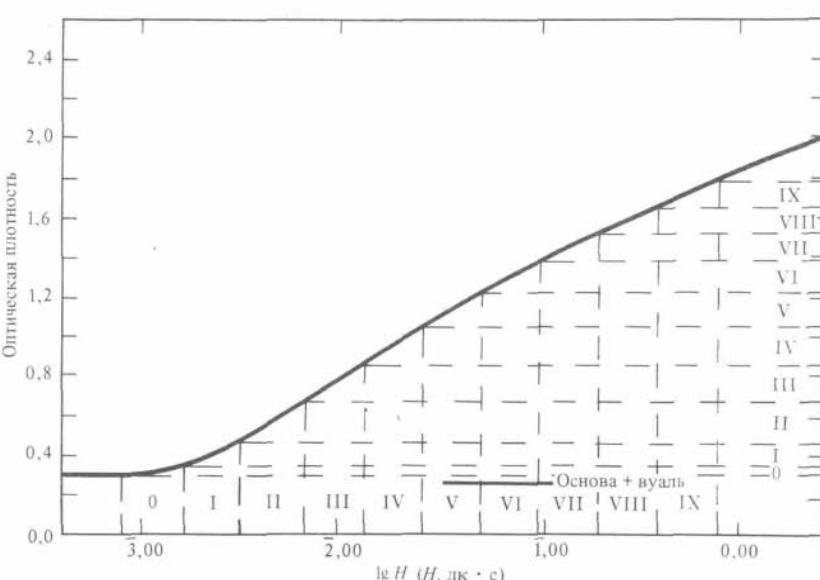
#### Зонная система

Зонная система, значительно усовершенствованная А. Адамсом и другими, может считаться лучшим методом определения правильной экспозиции и времени проявления. В используемой зонной системе варьируют экспозицию, и время проявления, добиваясь желаемого

результата. В некоторых случаях также подбирают контрастность фотобумаги, что, однако, является альтернативой для контролируемого процесса проявления и будет обсуждаться особо.

В зонной системе весь *интервал экспозиций* делится на *зоны* так, чтобы интервал каждой зоны составлял одну ступень (коэффициент 2 в яркости). Число зон экспозиций, необходимых для представления всего интервала экспозиций, зависит от контрастности сцены. Большинство зонных систем ограничено 9, 10 или 11 зонами. Десять зон экспозиций обеспечивают отношение контрастности чуть больше 1000:1, а интервал по шкале  $\lg H$  для характеристической кривой составляет приблизительно 3(10-0,3). На рис. 9.10 по оси  $\lg H$  характеристической кривой распределены 10 зон экспозиций. Если фотопленка экспонируется, как показано на рис. 9.10, и проявляется так, чтобы характеристическая кривая совпала с представленной на рисунке, то 10 зон экспозиций будут соответствовать 10 зонам оптической плотности фотопленки, как показано на рисунке. Отметим, что, хотя интервалы между зонами экспозиций равны и каждая из них составляет одну ступень, зоны

оптической плотности обычно не равны между собой. Полученный негатив может быть использован в фотоувеличителе для изготовления фотогравюр, и соотношение между зонами оптической плотности негатива и зонами серой шкалы оптической плотности в отраженном свете фотографии может быть таким, как показано на рис. 9.11.

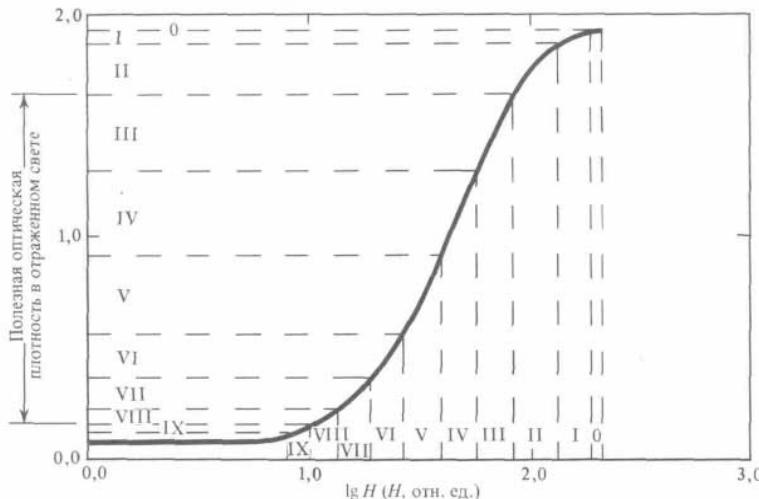


**Рис. 9.10.**

Характеристическая кривая фотопленки, показывающая связи между десятью зонами экспозиций и соответствующими зонами оптических плотностей при нормальном проявлении

Вообще говоря, промежутки между зонами серой шкалы не равны между собой и не равны интервалам соответствующих плотностей. Если экспозиция и проявление стандартны, то центр пятой зоны экспозиций соответствует экспозиции от 18%-ного серого эталона, а центр пятой зоны серой шкалы отражает 18% падающего на нее света. В нашем случае центр пятой зоны серой шкалы отражает 18% падающего на нее света (логарифм оптической плотности в отраженном свете равен 0,74). Однако невозможно воспроизвести 10 различных зон на фотобумаге № 2. Можно различить девять зон серой шкалы, но только шесть дополнительных зон лежат между обычными границами печатания (т. е. в полезной области оптических плотностей). Реально нельзя измерить яркость каждого участка сцены в отдельности; однако яркость, примерно соответствующая центру каждой зоны так же, как яркость 18%-ного серого эталона для пятой зоны, может быть измерена. В принципе все 10 зон могут быть напечатаны, так как центры нулевой и первой зон должны соответствовать разным точкам на кривой оптической плотности в отраженном свете.

Если при измерении яркости сцены обнаружено, что область экспозиций значительно меньше 10 зон (например, четыре зоны), то сцену называют малоконтрастной (коротко-масштабной). Если в такой ситуации используют стандартные экспозиции, проявление и печатание, то фотография будет вялой, что обычно нежелательно. С другой стороны, если яркости сцены таковы, что область экспозиций значительно превышает 10 зон (например, составляет 12 зон), то сцену называют высококонтрастной (длинномасштабной), и в этом случае



**Рис. 9.11.**

Характеристическая кривая фотобумаги, показывающая связь между зонами экспозиций и зонами серой шкалы оптической плотности. Зоны экспозиций соответствуют зонам оптической плотности на рис. 9.10.

стандартный путь приводит к контрастному снимку, что также нежелательно. Если объект таков, что интерес представляют очень темные тона (например, лицо темнокожего человека) или очень яркие тона (например, предметы на снегу), то обычно стандартные экспозиция, проявление и печатание дают невыразительный

снимок.

Цель зонной системы — управлять экспозицией, проявлением и печатанием так, чтобы изображение на фотографии совпадало со зрительной оценкой исходного объекта. Эта *предварительная зрительная оценка* определяется измеренными по зонной системе яркостями объекта и требованиями к окончательному виду фотографии. Повышение качества достигается варьированием экспозиции и (или) времени проявления. Чтобы эффективно применять зонную систему, вначале необходимо оценить используемую фотопленку для определения таких условий экспонирования, проявления и печатания, что для полученной фотографии 18%-ный серый объект будет 18%-ным серым, а яркости соответствующих зон будут отличаться таким же образом, как и разные тона конечного отпечатка. Это так называемые нормальные (*N*) экспозиция и проявление (рис. 9.10).

Следующим шагом (в калибровке) является варьирование времени проявления для последовательного изменения оптических плотностей негатива. Изменение времени проявления (и, следовательно, коэффициента контрастности), приводящее к тому, что плотность пятой зоны становится равной плотности четвертой зоны при нормальном проявлении, называется (*N*-<sup>^</sup>-проявлением). Область плотностей негатива уменьшается, как и средняя плотность. Все эти эффекты легко понять с помощью рис. 9.10 и 9.12. Если пятая зона плотности в результате измененного проявления становится такой же, как третья

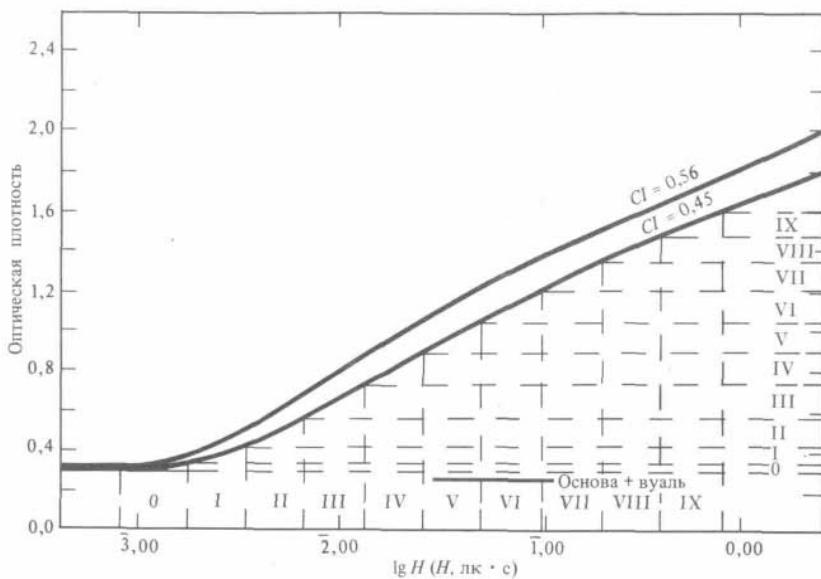


Рис. 9.12.

Графическое представление связи между зонами экспозиций и зонами оптических плотностей для фотопленки Kodak Plus-X Pan (рис. 9.8), подвергнутой ( $N-1$ )-проявлению.

зона плотности для нормального проявления, то говорят о  $(\Gamma^2)$ -проявлении. Аналогично определяют и времена для  $(N+1)$ - и  $(A^2)$ -проявлений, которые соответствуют увеличению коэффициента контрастности и сдвигают пятую зону плотности в шестую и седьмую зоны нормального проявления соответственно. Итак,  $(\Gamma^-)$ -

проявление уменьшает общую оптическую плотность и интервал оптических плотностей (рис. 9.12), а  $(\Gamma^+)$ -проявление увеличивает оптическую плотность и интервал оптических плотностей. Для более подробного ознакомления можно рекомендовать работу<sup>1)</sup>.

Увеличение или уменьшение экспозиции относительно нормальной экспозиции обозначается как  $(\Gamma^+)$ -или  $(N^-)$ -экспозиция. Например,  $(N-1)$ -экспозиция означает такое уменьшение экспозиции, что пятая зона плотности имеет такую же плотность, как четвертая зона при нормальной экспозиции (рис. 9.13). Следствием  $(N^-)$ -экспозиции является уменьшение плотности и интервала плотностей негатива, а для  $(N^+)$ -экспозиции наоборот. Например, результаты  $(V-1)$ -экспозиции или  $(N-1)$ -проявления почти эквивалентные, что графически проиллюстрировано на рис. 9.14.  $(N-1)$ -проявление уменьшает интервал плотностей несколько больше, чем  $(N-1)$ -экспозиция.

Путем систематического применения рассмотренного метода можно решить некоторые достаточно сложные фотографические проблемы. Если объект вялый (например, интервал экспозиций составляет

шесть степеней), увеличение времени проявления может быть использовано для расширения интервала оптических плотностей негатива, что приводит к снимку, обладающему большим диапазоном тонов, и, таким образом, помогает улучшить качество снимка (рис. 9.15).

Рис. 9.13.

Влияние  $(N^-)$ -экспозиции на оптическую плотность негатива, проявленного в нормальном режиме.

<sup>11</sup> White M., Zakia R., Lorenz R., The New Zone System Manual, Hastings-on-Hudson, N. Y.: Morgan and Morgan, 1976, p. 123.

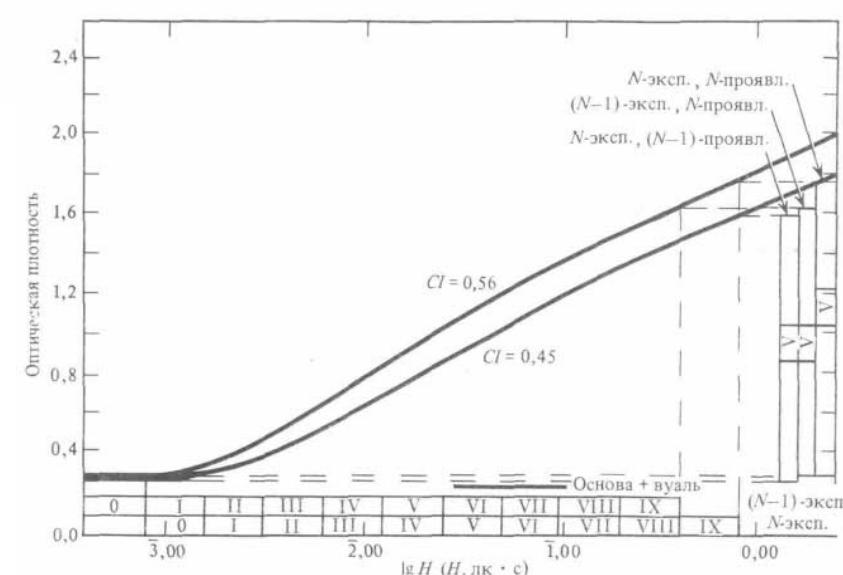
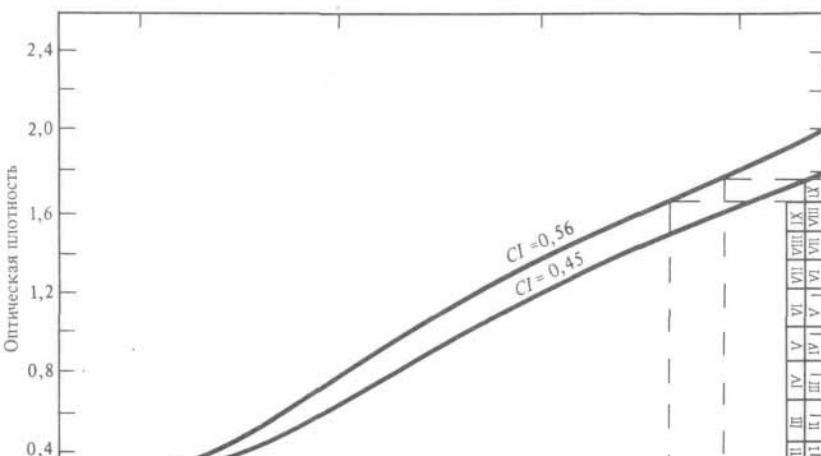


Рис. 9.14.

Сравнение результатов  $(N-1)$ -экспозиции и  $(N-1)$ -проявления.

При увеличении времени проявления шесть зон экспозиций

распространяются на интервал оптических плотностей, обычно занимаемый восемью зонами. Альтернативой при изготовлении снимка является использование нормального проявления и более контрастной фотобумаги. Сравнение с методикой, описанной в примере 9.5, показывает, что описанный в этом примере снимок был сделан на более контрастной бумаге, в то время как в нашем случае для решения проблемы использовалось увеличенное время проявления. В примере 9.6 предполагалось, что при фотографировании вялой сцены увеличение времени проявления должно сопровождаться уменьшением экспозиции.

Уменьшение экспозиции компенсирует увеличение оптической плотности, которое обычно является нежелательным побочным эффектом увеличения времени проявления. В примере, представленном на рис. 9.15, дальнейшее уменьшение экспозиции нежелательно, поскольку негатив уже совсем «тонкий» (прозрачный). -

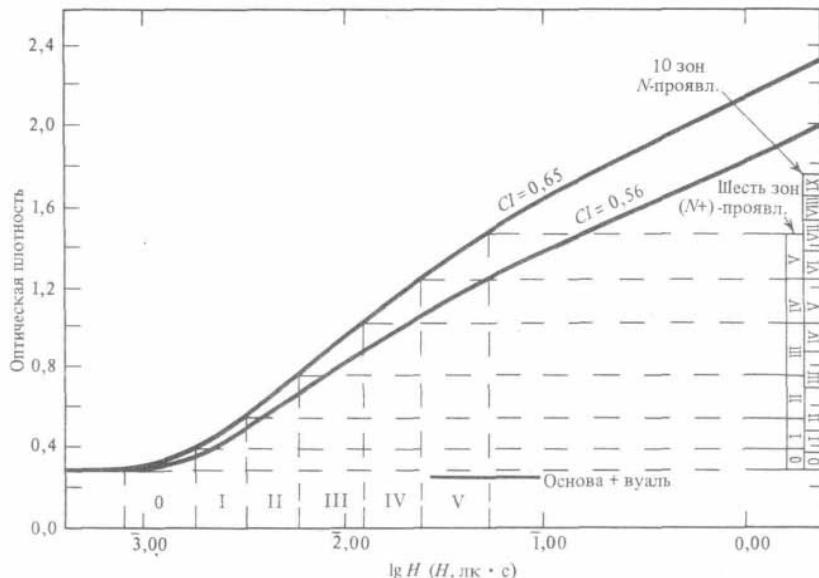


Рис. 9.15.

Расширение диапазона тонов негатива благодаря ( $N+$ )-проявлению.

Полезно помнить, что при использовании рассмотренного метода фотограф может увеличивать либо уменьшать экспозицию различных участков фотоснимка, осуществляя соответственно «пропечатывание» отдельных мест или их «притенение». В популярной литературе довольно часто описывается так называемый метод форсированного проявления.

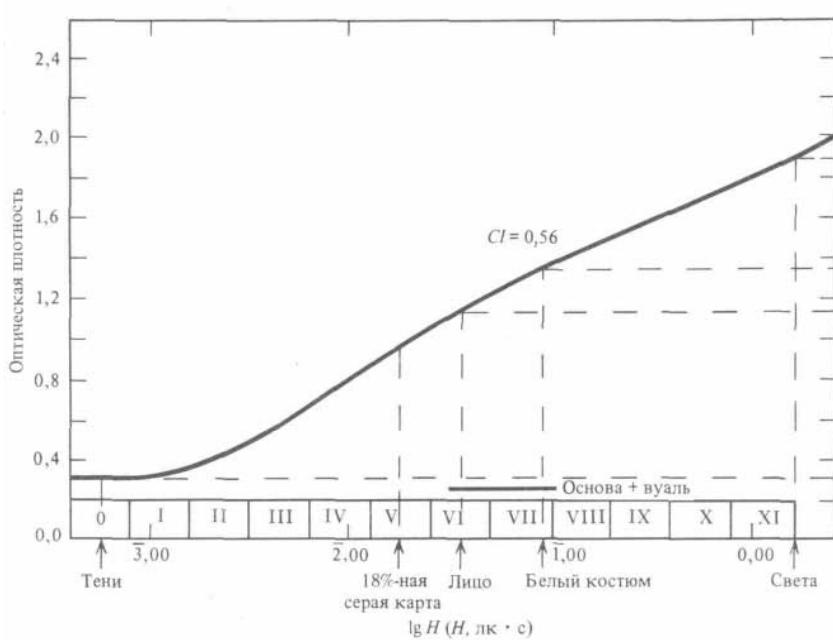
Этот метод состоит в недоэкспонировании фотопленки на одну или более ступеней и соответственно в увеличении времени проявления для компенсации недостаточного экспонирования. На практике его можно рекомендовать в случаях слишком низкого уровня освещенности сцены для нормальной экспозиции. Когда этот метод рассматривается с точки зрения зональной системы, соответствующая операция не всегда понятна. Если объект высококонтрастный, но тускло освещенный, наилучшим способом, по-видимому, является недоэкспонирование фотопленки на одну ступень при нормальном проявлении, особенно если в затененных участках сцены мало важных изобразительных деталей.

**Пример 9.7.** Пусть поставлена задача сфотографировать сольное эстрадное выступление рок-музыканта. Освещение обеспечивается главным образом софитами. Экспонометрический отчет точечного экспонометра указывает, что яркости перекрывают интервал по крайней мере в 12 ступеней. Измеряя яркость лица, и вводя корректировку на отражение, определим, что 18%-ный серый эталон будет недоэкспонирован на одну ступень для фотопленки Kodak Tri-X Pan, экспонированной при максимальном открытии диафрагмы и при наибольшем времени экспонирования, когда фотоаппарат еще может считаться устойчивым без использования штатива. Это практически ( $L^{-1}$ )-экспозиция. При использовании стандартного времени проявления определить интервал отсчета плотностей негатива. Какой снимок может быть получен на глянцевой бумаге № 2?

На рис. 9.16 18%-ный серый эталон соответствует экспозиции 2,55 по шкале  $\lg H$  для Л'-экспозиции. Экспозиция на одну ступень меньше соответствует приблизительно 2,25 по шкале  $\lg$

$N$ . Центр нулевой зоны (самые темные участки, неосвещенную направлением светом) расположен около приблизительно 4,75. Лицо исполнителя характеризуется значением 2,55, его белый костюм соответствует 2,95, и отраженные от инструментов блики находятся в зоне XI при 0,2.

Рис. 9.16. Характеристическая кривая для черно-белой фотопленки Kodak Tri-X Pan, показывающая соотношение между экспозицией и оптической плотностью в примере 9.7.



Соответствующие оптические плотности равны 0,3 [основа плюс вуаль]

(минимальная плотность)], 1,15 (светлое лицо), 1,35 (светлый костюм), 1,9 (отраженные блики). Интервал оптических плотностей негатива составит  $1,9 - 0,3 = 1,6$ . Из табл. 8.5 следует, что полезный интервал логарифмов экспозиций обычно составляет 1,3 для фотобумаги № 2 и 1,5 для фотобумаги № 1. Если надо сохранить детали в бликах от инструментов, фотографию печатают на бумаге № 1 и не увеличивают время проявления. На практике используют более жесткую (контрастную) фотобумагу и жертвуют некоторыми деталями в ярких светах. Некоторые темные ключевые тона будут потеряны, и изображение не будет удовлетворительным в случае темного лица исполнителя.

Конечно, зонная система представляет собой детально разработанный и надежный способ управления фотографическим процессом, позволяющий достичь желаемых результатов. В единую систему объединено большинство методов, обсужденных выше. Вероятно, этот метод слишком громоздок для рутинных фотографий, и большинство фотографов будут сокращать систему для большинства работ, за исключением наиболее точных. Вместо варьирования проявлением можно воспользоваться фотобумагой различной контрастности, особенно при использовании роликовой фотопленки, когда фотографирование различных объектов производится на одну кассету. Если выбрана зонная система, то экспозиции будут сохраняться, и это может привести к уменьшению числа зон. Для определения экспозиции можно выбрать измерение только яркостей светов, теней и 18%-ного серого эталона или использовать систему ключевого тона.

### Упражнения

- Сравните основные достоинства использования экспонометров отраженного и падающего света. При каких условиях применение одного из них предпочтительнее? Каковы преимущества и недостатки каждого способа?
- Каковы различия в принципе действия светочувствительных элементов экспонометров, изготовленных на основе сульфида кадмия и селена?
- Сравните способы эксплуатации встроенного в фотоаппарат ручного и точечного экспонометров. Каковы преимущества каждого из них?
- С помощью какого стандарта обычно калибруют экспонометры отраженного света? Как следует изменить найденную экспозицию при контроле сцены, отражательная способность которой выше, чем у 18%-ной серой карты?
- Экспонометром отраженного света измеряют свет, отраженный от ладони руки. Калькулятор установлен на чувствительность пленки в единицах ASA. Измеренные факторы экспозиции составляют 1:11 (относительное отверстие), 1/125 с (выдержка). Какова должна быть скорректированная экспозиция для нормального негатива? Как следует изменить установку экспонометра на светочувствительность пленки в единицах ASA, чтобы получить правильные факторы экспозиции?
- С какой целью разработана система ключевого тона?

7. Как определить установку калькулятора экспонометра на светочувствительность пленки в единицах ASA для неизвестного ключевого тона, используя: 1) стандартный источник света, 2) 18%-ную серую карту<sup>17</sup>
8. Темнокожего человека и белого человека фотографируют вместе. Как надо изменить нормальную экспозицию, чтобы получить наилучшее изображение их лиц?
9. Интервал яркостей сцены невелик. Как нужно изменить экспозицию и время проявления фотопленки, чтобы улучшить фотографию? Если надо решить эту задачу путем подбора контрастности фотобумаги, то какую бумагу необходимо выбрать?
10. Расскажите, что следует сделать, если используется  $(N + 2)$ -проявление в зонной системе?
11. Рассмотрите предыдущий вопрос для  $(N + \Delta)$ -экспозиции (рис. 9.13). Найдите интервал оптических плотностей для рассмотренного случая.

## Часть 4. Свет, цвет и светофильтры

### Глава 10. Источники света в фотографии

#### Спектральное распределение

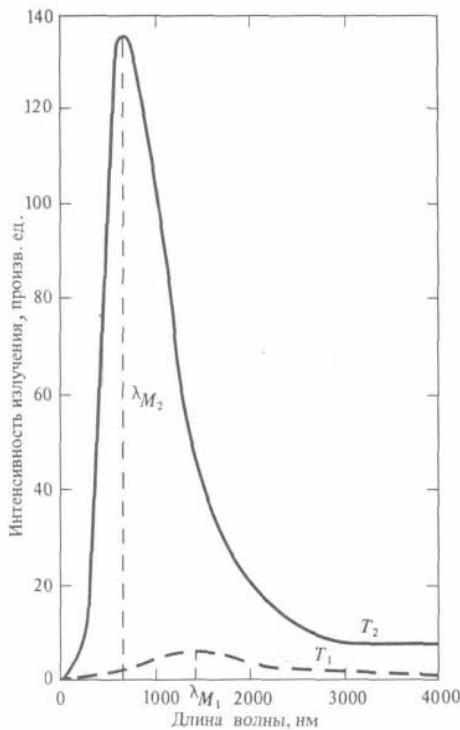
В гл. 4 обсуждалась природа электромагнитного спектра и отмечалось, что видимый свет занимает лишь малую часть спектра (приблизительно от 400 до 700 нм). В гл. 7 указывалось, что галогениды серебра чувствительны к электромагнитному излучению с длиной волны голубого света или более короткой, чем у него. При добавлении определенных сенсибилизирующих красителей в фотопленку последняя становится чувствительной к остальной части видимого спектра и частично к инфракрасному излучению. Для фотографирования в видимой части спектра предпочтительнее использовать источники света, которые дают достаточную освещенность в этой части спектра и незначительную в других частях. Большинство световых источников — это либо *абсолютно черные тела*<sup>18</sup>, либо источники с линейчатым спектром.

#### Абсолютно черное тело как источник света

Если электрокалорифер включить в сеть в затемненной комнате, то вначале его спираль не будет видна. По мере нагрева она становится тусклово-красной, а затем ярко-оранжевой. Если увеличить мощность, подводимую к спирали, то она может стать почти белой, как электрическая лампочка. Такие источники света называются *накалыми* и излучают свет сплошного спектра. Этот спектр аппроксимируется так называемой кривой излучения абсолютно черного тела. Спектральное распределение излучения абсолютно черного тела зависит только от температуры источника света. Кривые на рис. 10.1 показывают относительные интенсивности излучения для двух раскаленных тел при разных температурах в зависимости от длины волны. С ростом температуры тела максимум распределения интенсивности излучения смещается в сторону более коротких длин волн. Закон смещения Вина, описывающий изменение максимума распределения с температурой, можно представить в виде  $X_Mr = \text{const}$ , (10.1)

1) Правильнее сказать, накаленные тела, испускающие свет по законам термодинамического излучения — *Прим ред*  
**Рис. 10.1.**

Кривые спектрального распределения излучения абсолютно черного тела для двух раскаленных тел при температурах 2000 K ( $T_1$ ) и 4000 K ( $T_2$ ).



где  $T$  — абсолютная температура абсолютно черного тела и  $\lambda_M$  — длина волны, соответствующая максимуму распределения. Абсолютная температура (по шкале Кельвина) — это температура по шкале Цельсия плюс 273. Нуль этой шкалы, сдвинутый от точки таяния льда на  $-273$  К (К — кельвин), называется абсолютным нулем и представляет собой теоретически достижимый нижний предел охлаждения. С ростом температуры тела интенсивность его излучения также увеличивается. В идеализированном случае это увеличение пропорционально  $T^4$ .

**Пример 10.1.** На рис. 10.1 представлены кривые излучения тел при  $4000$  К ( $\Gamma_2$ ) и  $2000$  К ( $\Gamma_v$ ). Проверить закон смещения Вина. Определить температуру тел по шкале Цельсия. Максимумы кривых приблизительно соответствуют  $700$  нм для  $T_2$  и  $1400$  нм для  $T_v$ . Так как  $\lambda_M T = 700 \cdot 4000 - 1400 \cdot 2000$ , получим подтверждение закона Вина. Температуры тел по шкале Цельсия составляют  $4000 - 273 = 3727^\circ$  С и  $2000 - 273 = 1727^\circ$  С.

Так как спектральное распределение излучения абсолютно черного тела зависит только от его температуры, ее можно использовать в качестве характеристики излучения (*цветовая температура*). Цветовые температуры излучающих тел, представленных рис. 10.1, составляют  $2000$  и  $4000$  К. Большинство накальных источников света обладает спектральным распределением, приблизительно как у абсолютно черного тела, и поэтому с такими источниками можно сопоставлять соответствующие цветовые температуры. В основном цветовая темпе-

**Таблица 10.1. Цветовые температуры, соответствующие различным условиям дневного освещения**

| Условия освещения                                      | Температура, К |
|--|----------------|
| Прямой солнечный свет в полдень                        | 5400           |
| Прямой солнечный свет утром или вечером                | 4900           |
| Направленный солнечный свет от голубого неба в полдень | 6 100          |
| Направленный солнечный свет и                          | 5 600          |

|                                  |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|
| свет от голубого неба утром или  |       |       |
| вечером                          | 5700  | 6200  |
| Направленный солнечный свет от   |       |       |
| облачного неба                   | 5 700 | 5900  |
| Свет от неба, покрытого светлыми |       |       |
| облаками                         | 6700  | 7000  |
| Свет от пасмурного неба          | 7500  | 8400  |
| Свет от голубого неба (открытая  |       |       |
| тень)                            | 12000 | 27000 |

ратура используется для характеристики дневного освещения. Цветовые температуры для различных условий дневного освещения представлены в табл. 10.1. Зиме соответствуют низкие температуры, лету — высокие. Напомним, что цветовые температуры, перечисленные в табл. 10.1, характеризуют природу излучения, а не температуру источника. Приведенные в таблице данные не означают, что голубое небо теплее, нежели солнце. Цветовая температура излучения лампы накаливания варьирует от 2800 К для 75-Вт домашней лампы до 3400 К для специальных перекальных фотоламп. Следует отметить, что эти цветовые температуры намного ниже, чем для дневного освещения. Обычно в черно-белой фотографии цвет источника света не играет столь важной роли, как в цветной.

Цветовая температура ламп накаливания обычно уменьшается по мере эксплуатации лампы, поскольку металл постепенно испаряется с нити накала и оседает на поверхность стекла. Для уменьшения испарения некоторые лампы накаливания заполняются специальным газом. Например, кварцевая йодная лампа представляет собой кварцевый баллон, заполненныйарами иода, что позволяет эксплуатировать ее при высоких температурах.

Другой величиной, используемой для характеристики излучения, является *майред* ( $M$ ), определяемый как

$M=10^6/T$ , (10.2) где  $T$  — температура источника излучения в Кельвинах. Из соотношения (10.1) видно, что положение на оси длин волн максимума кривой излучения абсолютно черного тела пропорционально  $1/T$ , следовательно, пропорционально  $M$ . Изменение величины  $M$  может быть соотнесено со смещением максимума кривой излучения абсолютно черного тела. Из-за специфической особенности восприятия цвета глазом понятие майред особенно полезно при характеристике *корректирующих светофильтров*, что подробно обсуждается в гл. 13.

**Пример 10.2.** Предположим, что в безоблачный день цветовая температура солнечного света и голубого неба составляет  $T_c=6000$  К, а температура только голубого неба  $\Gamma_r=12\ 000$  К. Найти цветовую температуру в майредах для каждого из этих световых источников и сравнить полученные величины с величиной  $M$  для лампы накаливания, цветовая температура которой  $\Gamma_h=3000$  К.

Для солнечного света и голубого неба находим  $M_c=10^6/6000=166,67$ , только для голубого неба  $M_r=10^6/12\ 000=83,33$ , и для лампы накаливания  $M_h=10^6/3000=333,33$ . Полученные результаты представлены в табл. 10.2. Изменение цветовых температур для двух источников дневного освещения в два раза больше изменения цветовых температур между солнцем и голубым небом и лампой накаливания. В то же время изменения величины в майредах в первом случае в два раза меньше, чем во втором. Следовательно, смещение максимума кривой излучения в первом случае будет в два раза меньше, чем во втором. Обычно изменения цветовых температур источников холодного света в большей степени влияют на их световые характеристики, чем аналогичные изменения цветовых температур в случае относительно горячих источников.

Так как фотопленка чувствительна к излучению в ультрафиолетовой части спектра, ультрафиолетовая составляющая излучения абсолютно черного тела может приводить к нежелательным результатам при экспонировании фотопленки. При увеличении температуры

светового источника доля ультрафиолетовой составляющей излучения растет и, следовательно, экспозиция увеличивается больше, чем воспринимает глаз. К счастью,

**Таблица 10.2. Результаты примера 10.2**

| Источник света           | Цветовая<br>температура | $T, K$ | $M(10^6/7), K$ |
|--------------------------|-------------------------|--------|----------------|
| Голубое небо             | 12000                   | 83 167 |                |
| Солнце + голубое<br>небо | 6000                    |        |                |
| Лампа накаливания        | 3000                    | 333    |                |

оптическое стекло поглощает значительную долю ультрафиолетового излучения, компенсируя до некоторой степени этот нежелательный эффект.

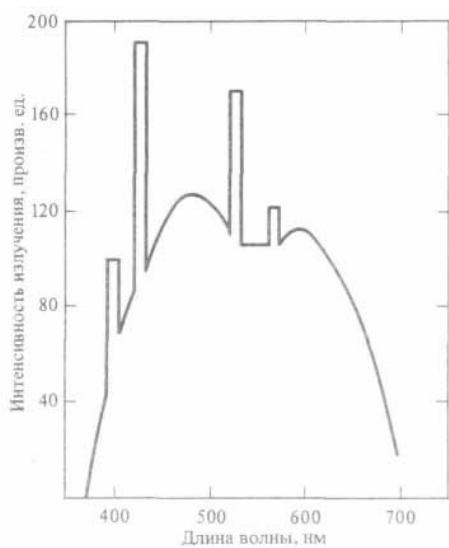
#### Люминесцентное освещение

Люминесцентные лампы представляют собой стеклянные трубы, наполненныеарами ртути, которые, будучи электрически возбужденными, испускают ультрафиолетовые лучи. В свою очередь это излучение возбуждает нанесенные на внутреннюю поверхность стеклянной оболочки *люминофоры*, излучение которых приходится на видимую часть спектра. Природа этого возбуждения такова, что люминофоры (фосфоры) излучают дискретный набор спектральных полос, расположенных на фоне непрерывного спектра. На рис. 10.2 представлено спектральное распределение излучения типичной люминесцентной лампы. Следует отметить, что цветовое восприятие света подобных ламп зависит от состава люминофора и спектральной характеристики глаза (гл.6).

Так как характеристики спектральной чувствительности фотопленки и глаза различаются, фотопленка будет фиксировать свет иначе, чем глаз. По этой причине использование люминесцентного освещения в цветной фотографии вызывает значительные затруднения. Кроме различия спектральной чувствительности глаза и цветной фотопленки существует проблема, связанная с зависимостью цвета красителя от природы падающего света. Например, два красителя, кажущиеся идентичными для глаза при солнечном освещении, могут выглядеть совершенно различными при рассматривании их при «дневном» люминесцентном освещении.

#### Импульсные лампы

Импульсное освещение осуществляется с помощью



**Рис. 10.2.**

Спектральное распределение излучения люминесцентной лампы дневного света.  
лампы-вспышки или электронного импульсного осветителя. Современная лампа-вспышка представляет собой стеклянную колбу, наполненную кислородом и фольгой или проволокой из алюминия или циркония<sup>1</sup>). Иногда лампы-вспышки снабжают запалом, приводящимся в действие ударным способом. Большинство современных ламп-вспышек поджигается от источника тока. Испускаемое горящим металлом излучение имеет цветовую температуру, промежуточную между цветовыми температурамивольфрамовой лампы накаливания и дневного освещения. Обычно на баллон лампы-вспышки наносят специальное голубое покрытие для баланса цветов, в результате чего их можно использовать и для цветных фотопленок. После поджига требуется некоторое время, чтобы яркость свечения достигла максимального значения. На рис.

10.3 показаны изменения яркости двух различных типов таких ламп. Большинство ламп-вспышек срабатывает так, как показано на рисунке для типа 5 В. Такие лампы обозначаются как лампы-вспышки класса М и применяются главным образом с фотокамерами, снаженными шторным затвором. При использовании лампы типа 5 В с фотоаппаратом, снаженным центральным затвором, импульсное

освещение синхронизируют со временем срабатывания затвора таким образом, чтобы поджиг лампы-вспышки осуществлялся немного раньше, чем открывается затвор. Это необходимо потому, что время достижения максимума излучения для лампы составляет около 20 мс (1/50 с). Такая задержка во времени вызывает значительные трудности при высоких скоростях срабатывания затвора (1/500 с=2 мс), если последний приводится в действие одновременно с лампой. Экспозиция фотопленки может завершиться еще до того, как лампа осветит объект. В случае длительных экспозиций такой проблемы не существует. Рассмотренный тип синхронизации называется *M-синхронизацией*. В современных фотокамерах предусмотрено несколько типов синхронизации. Разъем или гнездо, предназначенные для использования с лампой-вспышкой этого типа, маркируются буквой *M*.

Из рис. 10.3 следует, что яркость свечения лампы изменяется в течение времени ее горения. Если для короткого времени экспонирования (например, для 1/1000 с=1 мс) эти изменения незначительны, то для более длительных выдержек (например, 1/50 с = 20 мс) их влияние становится существенным. Это означает, что экспозиция фотопленки не пропорциональна времени, в течение которого открыт затвор фотоаппарата. Следовательно, необходим некий метод, который позволял бы учитывать изменения создаваемой освещенности.

"В последнее время широкое распространение у фотолюбителей получили так называемые вспышки-кубики, позволяющие производить не одну, а четыре вспышки при последовательных поворотах на 90°. Конструктивная разновидность таких ламп-вспышек — состоящий из восьми ламп-вспышек плоский импульсный осветитель, конструкция которого позволяет последовательно использовать каждую лампу-вспышку. Лампы-кубики выпускаются в СССР с 1980 г. — Прим перев

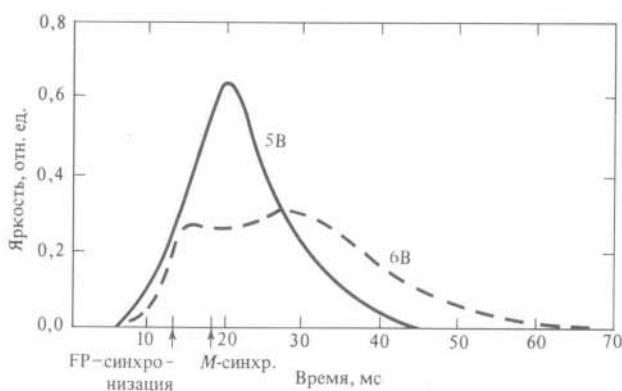


Рис. 10.3.

Продолжительность свечения двух типов импульсных ламп (5B и 6B) и синхронизация работы затвора.

Импульсный источник света может быть охарактеризован величиной, равной общей освещенности предмета в течение экспонирования. Для данного времени экспонирования количество света, достигшего пленки, зависит от количества света, освещившего объект съемки, и величины относительного отверстия объектива. Количество света, необходимое для получения негатива с нормальной плотностью, зависит от

светочувствительности фотопленки. При определении оптимальной экспозиции используют *ведущее число K*. Ведущее число является функцией светового выхода импульсного источника в течение выдержки и чувствительности фотопленки. Для определенной пленки и скорости срабатывания затвора справедливо соотношение

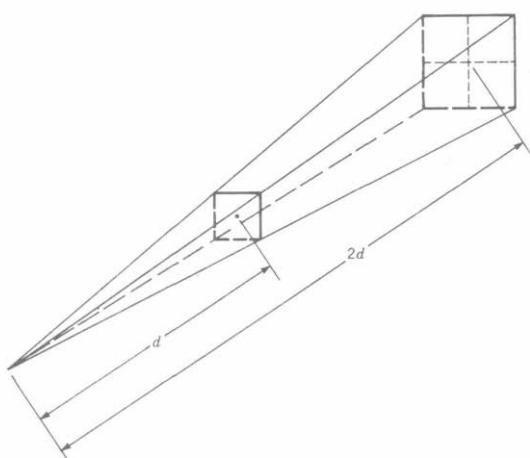
$K=f/-d$ , (10.3) где // — диафрагменное число,  $d$  — расстояние от источника до предмета при его фронтальном освещении. Значение ведущего числа зависит от единиц, в которых измеряется это расстояние. Если  $d$  измеряется в метрах, то ведущее число составляет приблизительно 1/3 величины  $K$ , когда  $d$  измеряется в футах.

Чтобы оценить справедливость этого соотношения, представим себе, что человек, находящийся в темной комнате, пытается читать при свете свечи. Чем дальше он будет находиться от свечи, тем слабее будет свет. Из рис. 10.4 понятно, как уменьшается освещенность с расстоянием при его удвоении. Отметим, что пучок света, освещающий площадку  $A$  на расстоянии  $d$ , освещает площадку 44, находящуюся на расстоянии  $Id$ , так как и ширина, и высота площадки удваиваются с удвоением расстояния от источника. Следовательно, освещенность площадки на расстоянии  $2d$  равна 1/4 освещенности площадки на расстоянии  $d$ . Полученный вывод можно обобщить и сказать, что освещенность объекта обратно пропорциональна квадрату расстояния между ним и источником света. Выше было установлено, что освещенность фотопленки обратно пропорциональна квадрату диафрагменного числа. Если расстояние от лампы до объекта удваивается, то только 1/4 часть света достигает предмета.

Рис. 10.4.

Зависимость освещенности объекта от расстояния до точечного источника света.

Если пленка должна получить одну и ту же экспозицию, диафрагму следует открыть на две ступени. Это означает, что диафрагменное число

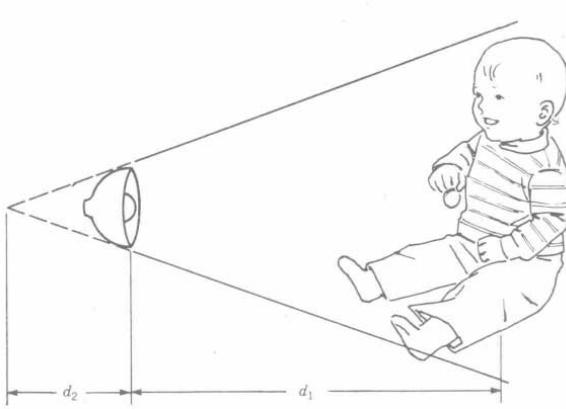


должно быть уменьшено в два раза, чтобы произведение ( $dfl$ ) не изменилось.

Количество света, достигшего предмета, зависит также от типа отражателя, с которым используется лампа, а также от отражательных способностей окружающих поверхностей.

Значения ведущих чисел приводятся для зеркальных или для диффузных отражателей в предположении, что лампа используется в комнате средних размером со стенами, окрашенными в светлые тона. Если отражатель приводит к значительной фокусировке света, то предпочтительнее вместо реального расстояния объекта до источника света при вычислении диафрагменного числа взять расстояние до точки пересечения сходящегося пучка лучей. Например, в случае, изображенном на рис. 10.5, необходимо использовать не  $d_v$ , а  $d_v + d_2$ . Чем меньше  $d_v$  тем больше ошибка при пренебрежении расстоянием  $d_2$ . Работая вне помещения, в очень большой комнате или в комнате с очень темными стенами, ведущее число надо уменьшать, чтобы скорректировать отсутствие света, отраженного от стен. В предельных случаях при использовании открытого отражателя корректирующий коэффициент может быть равен 2 или больше.

Кроме того, ведущее число пропорционально квадратному корню из значения чувствительности фотопленки в единицах ASA. Это объясняется тем, что диафрагменное число для оптимальной экспозиции пропорционально квадратному корню из значения чувствительности пленки в единицах ASA. Из выражения (10.3) следует, что ведущее число пропорционально диафрагменному числу. Между величиной  $K$  и временем экспонирования не существует простой аналитической связи.



**Рис. 10.5.**

Определение расстояния освещаемого объекта до помещенного в отражатель источника света при вычислении диафрагменного числа

Обычно эту связь определяют эмпирически и изготовитель прилагает такую информацию к лампам. Имеются справочники, в которых можно найти подробные характеристики различного типа импульсных осветителей.

**Пример 10.3.** Небольшой полированный неглубокий сферический отражатель используется с лампой-вспышкой типа 5В. Ведущее число (в футах) для этой лампы вспышки при экспозиции 1/60 с равно 120 для черно-белой фотопленки 125 ASA. Предмет освещается спереди в комнате

средних размеров при диафрагменном числе 16. На каком расстоянии от предмета должна быть помещена лампа? Определить величину ведущего числа и диафрагменного числа для цветной фотопленки (64 ASA) при съемке вне помещения на том же расстоянии.

Из равенства (10.3) получим  $120 = I_0 d$ . Следовательно,  $d$  равно 7,5 фута. Если перейти на менее чувствительную фото-пленку, то величину  $K$  надо умножить на коэффициент  $164/125$ , который приблизительно равен обратной величине "\AT (около 0,7). Новое ведущее число будет равно приблизительно 85, и новое диафрагменное число составит приблизительно 11. Возвращаясь к исходному диафрагменному числу, получим, что новое расстояние должно быть равно  $85/16 = 5,3$  фута. Для рассмотренной комбинации лампы-вспышки и фотопленки ведущее число составляет 60 для скорости срабатывания затвора 1/500 с, а максимальное ведущее число равно приблизительно 150.

Лампа-вспышка типа 6В относится к так называемым импульсным FP-лампам и предназначается для использования с фотокамерами, снабженными шторными затворами. Лампа сконструирована таким образом, что достигает максимума освещенности немного раньше, чем лампа типа 5В (рис. 10.3), и обеспечивает приблизительно постоянный уровень освещенности в течение более длительного времени. Напомним, что при съемке наиболее распространенными фотоаппаратами со шторными затворами применяют выдержку 1/60 с (17 мс), несмотря на то что время экспонирования любой части сюжета может быть меньше 1/1000 с (1 мс<sup>-1</sup>). Предположим, что лампа-вспышка типа 5В используется для освещения равномерно окрашенной стены и что съемка производится фотокамерой, оборудованной шторным затвором с установкой выдержки на 1/1000 с. Из рис. 10.3 видно, что не существует временного интервала 20 мс, в котором освещенность оставалась бы постоянной. Если затвор приведен в действие в момент времени, обозначенный на графике как FP-синхронизация, то максимальная яркость будет соответствовать моменту регистрации центрального участка сцены (примерно через 10 мс после приведения в действие затвора) и минимальная — регистрации краев сцены. С другой стороны, лампа-вспышка типа 6В создает равномерную освещенность в течение более длительного времени, что приводит к созданию более однородного изображения.

FP-синхронизирующий контакт и переключатель, установленные на фотокамерах со шторным затвором, осуществляют задержку срабатывания затвора после поджига лампы-вспышки, что позволяет достичь максимума излучения лампы до того, как затвор начинает открываться. Одна и та же система ведущих чисел используется для ламп-вспышек как типа FP, так и типа M. Если освещенность постоянна во времени, то ведущее число пропорционально квадратному корню из времени экспонирования для лампы данного типа. Это объясняется зависимостью величины  $K$  от // и тем, что удвоение времени экспонирования эквивалентно открытию диафрагмы на одну ступень при использовании постоянной освещенности (например, от перекальной фотолампы).

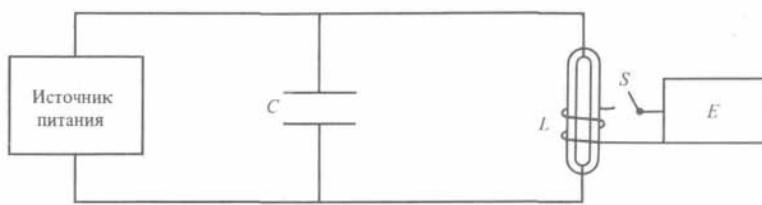
### Электронные импульсные осветители

Электронная импульсная лампа состоит из кварцевого баллона, который обычно наполняется инертным газом — ксеноном под давлением. Иногда в ксенон добавляются другие газы для улучшения спектрального состава излучаемого света. Излучение видимого света вызывается ионизацией газа при разряде через лампу заряженного конденсатора большой емкости. Газ выбирается так, чтобы излучение по спектральному составу приближалось к дневному свету. Принципиальная схема электрической цепи электронной импульсной лампы представлена на рис. 10.6. Блок питания может подключаться как к сети переменного тока, так и к батареям и работает на частоте около 200 Гц. Величина приложенного к конденсатору  $C$  и лампе  $L$  постоянного напряжения зависит от типа используемой лампы и меняется от 350 до 20 000 В. Типичные портативные лампы работают при напряжении, меньшем чем 1000 В.

<sup>1)</sup> У отечественных камер более распространена синхронизированная выдержка 1/30 с (34 мс). — Прим. ред.

Рис. 10.6.

Принципиальная схема подключения электронной импульсной лампы



Поджигающее напряжение подается от источника питания  $E$  и создает высокоинтенсивное электромагнитное поле, которое

вызывает разряд. Когда переключатель  $S$  включен, в лампе возникает разряд и конденсатор  $C$  разряжается, вызывая яркую вспышку. После разряда блок питания перезаряжает конденсатор. Продолжительность вспышки зависит от напряжения на лампе и обычно составляет от 1/500 до 1/1000 с для портативных ламп. Мощность вспышки определяется емкостью конденсатора и напряжением на лампе. Для портативных ламп мощность вспышки зависит от характеристик батарей.

Световая отдача (осветительная способность) электронных импульсных ламп характеризуется на практике ведущим числом для каждой чувствительности фотопленки (аналогично лампам-вспышкам) или (реже) световым потоком, излученным лампой за время вспышки, который измеряется в канделях на секунду (кд-с). Полная мощность вспышки пропорциональна этой осветительной способности. Для определенного типа пленки ведущее число пропорционально квадратному корню из номинального значения световой отдачи. Так как кандела — мера мощности светового импульса, кандела на секунду есть мера общего светового выхода импульсного источника. Можно пользоваться и «лучевой» канделой на секунду, которая представляет собой меру полного светового выхода направленного источника. Некоторые портативные электронные импульсные лампы снабжаются очень глубокими отражателями, использование которых может приводить к трудностям при определении экспозиции на основе ведущего числа. Эффективное расстояние от предмета до источника света (рис. 10.5) в этом случае может значительно отличаться от реального, особенно когда импульсная лампа расположена близко к предмету. Поэтому при определении экспозиции с помощью ведущего числа часто проводят «калибровку» лампы в реальных условиях и с определенным отражателем. Вероятно, эта проблема обусловлена сложностью взаимосвязи пространства, в котором используется лампа, с пространством, в котором она калибровалась.

В последние годы электронные импульсные лампы были значительно усовершенствованы благодаря успехам, достигнутым в современной микроэлектронике. Так были разработаны автоматические электронные импульсные устройства, которые снабжены встроенными датчиками света для контроля количества света, отраженного от предмета и достигшего фотокамеры. После того как определенное количество света попадает на этот датчик, лампа выключается. Контроль количества света и управление временем вспышки осуществляются таким встроенным датчиком отраженного света вспышки. Для повышения эффективности этот датчик должен быть установлен на фотокамере или около нее и направлен строго в сторону предмета.

Поскольку светоприемник функционирует подобно любому измерителю отраженного света, пригодны любые схемы и датчики, используемые в технике для этих целей. В частности, вспомним, что экспонометры калиброваны по среднему объекту (18 %-ная серая карта), однако не все объекты являются средними. Так как время вспышки часто бывает меньше чем 1/1000 с, может

оказаться необходимым внесение поправки в закон взаимозаместимости. В первых автоматических электронных вспышках для прекращения импульса свечения применялось закорачивание конденсатора, что приводило к напрасным потерям запасенной в нем энергии. Использование современных быстродействующих электронных выключателей (тиристоров) позволяет гасить лампу таким образом, что оставшийся заряд конденсатора используется в последующей вспышке. Таким образом, требуется меньше энергии для подзарядки конденсатора, что уменьшает время зарядки и удлиняет срок службы источников питания.

Поскольку время вспышки очень коротко, необходимо задержать начало импульса до того момента, когда затвор полностью откроется. Такая задержка достигается подсоединением импульсного осветителя к синхронизатору, который срабатывает после того, как затвор полностью открывается. Соответствующий разъем маркируется на многих фотокамерах как X или как X sync. Обычно время задержки для центральных затворов очень мало; для малоформатных камер со шторными затворами оно составляет от 1/60 до 1/125 с — время, которое требуется для открытия ведущей шторки. Поскольку длительность вспышки мала, электронный импульсный осветитель нельзя использовать со шторными затворами при временах экспонирования, меньших времени полного открытия затвора. Иначе часть кадра останется темной, так как закрывающая шторка начинает двигаться перед кадровым окном до того, как ведущая шторка его открывает<sup>11</sup>. Это ограничение может быть весьма неудобным при использовании импульсного освещения

совместно с другими источниками непрерывного освещения.

Большинство электронных импульсных осветителей снабжено дисковым калькулятором, который позволяет выполнять вычисления согласно равенству (10.4). Такой прибор представлен на рис. 10.7. На калькуляторе устанавливается соответствующая чувствительность фотопленки в единицах ASA, которая используется при фотосъемке; при этом всевозможные сочетания допустимых значений диафрагменных чисел и расстояний до объекта располагаются друг против друга.

<sup>11</sup> Принцип устройства шторного затвора описан в гл. 2. — Прим. перев.  
Рис. 10.7.

Типичный дисковый калькулятор электронной фотовспышки.

Поскольку вычисления очень просты, некоторые фотографы используют калькулятор главным образом для проверки ведущего числа осветителя по отношению к используемой фотопленке.

**Пример 10.4.** С помощью показанной на рис. 10.7 шкалы калькулятора определить ведущее число электронной импульсной лампы для фотопленки, чувствительность которой 400 ASA. Чему равно ведущее число для фотопленки 800 ASA?

Находим, что дистанция 30 футов лежит против значения 8, если калькулятор настроен на чувствительность 400 ASA. Следовательно, ведущее число, выраженное в футах, составляет около 240 и около  $8 \cdot 10 = 80$  — в метрах. Так как фотопленка 800 ASA в два раза чувствительнее фотопленки 400 ASA, диафрагма может быть закрыта на одну ступень при одном и том же расстоянии до осветителя; в этом случае ведущее число составляет около  $A_2 \sim 240 / 2 = 120$  (расстояние в футах) или около НО (расстояние в метрах).

#### Применение импульсного освещения

Импульсное освещение (с помощью ламп-вспышек или электронных импульсных осветителей) настолько сильно зависит от рефлектора лампы и отражающих свойств поверхностей окружающего пространства, в котором они находятся, что не нужно слишком удивляться тому, что ведущее число и мощность излучения лампы в лучшем случае служат только ориентиром при определении соответствующей экспозиции. Усредненные величины определяются недостаточно хорошо, да и фотографические ситуации весьма далеки от среднего. Например, если импульсная лампа используется вне помещения, где нет доступных отражающих поверхностей, ведущее число часто необходимо уменьшить по крайней мере в два раза (две ступени экспозиции).

Специальный экспонометр — фешметр, предназначенный для измерения падающего и (или) отраженного света при импульсном освещении, может быть весьма полезным для определения правильной экспозиции. Это устройство позволяет измерять короткие импульсы света и обычно нечувствительно к постоянному фоновому освещению. Используя фешметр, можно определять правильную экспозицию объекта или калибровать

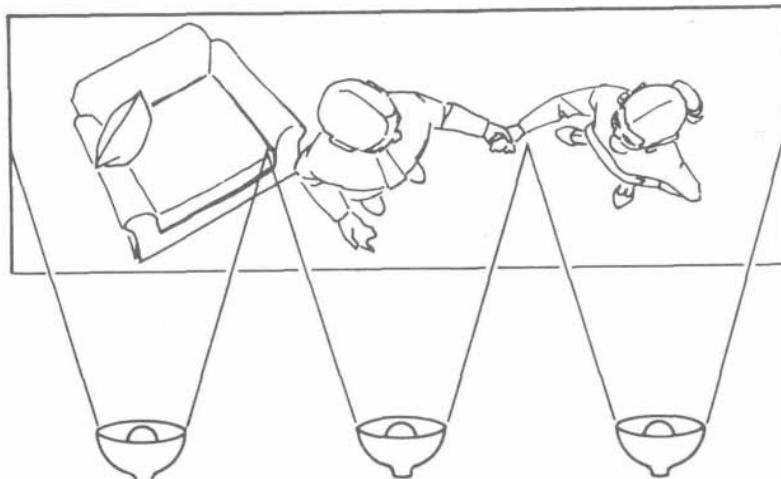


импульсный источник света для использования в конкретном помещении.

Выбор между электронной импульсной лампой или лампой-вспышкой зависит от обстоятельств и условий съемки. Если фотограф не часто пользуется импульсным освещением, то, вероятно, лампе-вспышке следует отдать предпочтение, поскольку техническое обслуживание батарей и (или) конденсаторов при нерегулярном использовании электронной импульсной лампы довольно затруднительно. С другой стороны, электронные импульсные осветители, используемые постоянно, требуют незначительного ухода и значительно более надежны при работе в «полевых» условиях по сравнению с лампой-вспышкой, так как последняя поджигается с помощью низкого напряжения, а сопротивление окисленных контактов может быть слишком высоким. Затруднения и неудобства, связанные с необходимостью повторного фотографирования после того, как лампа-вспышка не зажглась, вызывают чувство сильной досады, в то же время зачистка контактов не всегда приводит к положительным результатам.

Если в некоторых случаях необходимо использовать много источников импульсного освещения, то обычно наиболее удобными оказываются лампы-вспышки, так как даже мощная-любительская электронная импульсная лампа создает приблизительно такое же освещение по яркости, как и лампа-вспышка типа 5В. Лампа-вспышка № 50 дает приблизительно в 10 раз больше света. Синхронизация типа *открытая вспышка* позволяет использовать полный световой выход лампы-вспышки в том случае, когда она является единственным источником освещения. В этой ситуации сначала открывают затвор (головка затвора устанавливается в положении «В») и лампа зажигается. Такого же эффекта можно достичь и другим, более удобным путем, используя X-синхронизацию для поджига лампы после открытия затвора при длительной выдержке (порядка 1 с), чтобы предотвратить закрытие затвора, пока лампа не погаснет. Если требуется увеличить освещение по сравнению с тем, которое можно получить от одной импульсной лампы, надо использовать несколько ламп. Если для освещения сцены применяют несколько осветительных устройств с одинаковой световой мощностью таким образом, что их свет не перекрывается (рис. 10.8), то ведущее число комбинации ламп равно ведущему числу каждой из них. Если для освещения сцены используются  $/V$  установок с одинаковыми ведущими числами, свет от которых полностью перекрывается (рис. 10.9), то ведущее число системы равно

$K_N = T/NK$ . (Ю.4) Это следует из того факта, что освещенность от двух световых источников, используемых совместно, равна сумме освещенностей от каждого из них в отдельности. Так как световая мощность одного источника пропорциональна квадрату ведущего числа, получаем равенство (10.4)<sup>1</sup>)



синхронизации с затвором. В этом случае синхронизация всех ламп может быть достигнута, если к фотоаппарату подсоединить одну электронную импульсную лампу, а специальные электронные устройства, подключенные к остальным лампам, направить на фотоаппарат.

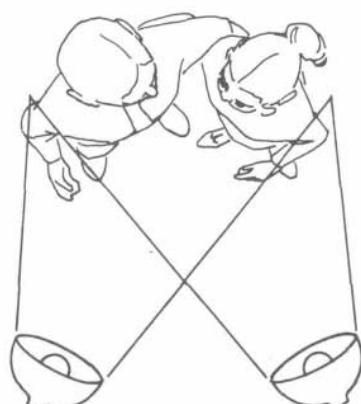


Рис. 10.8.

Освещение сцены тремя импульсными осветителями без наложения света.

Когда используется несколько световых источников с разными ведущими числами ( $Xp K_{2\dots}$ ) для освещения сцены с полным перекрыванием, ведущее число системы равно

$$K_N = VK? + K\dagger + \dots + K^2_N / 7 \text{ (Ю.5)}$$

Вывод этого выражения такой же, как в случае (10.4). Если используется несколько осветительных импульсных установок одновременно, нет необходимости подсоединять их все к фотоаппарату для

Рис. 10.9.

Освещение сцены двумя импульсными осветителями при полном перекрывании света.

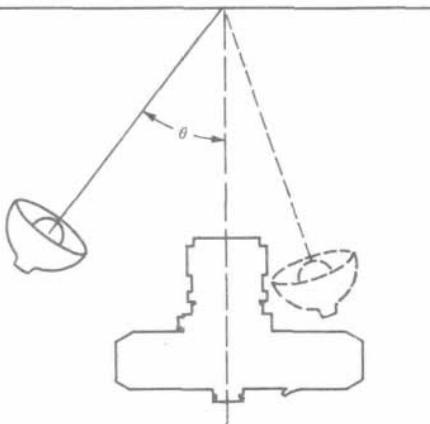
О Пусть  $/$  — освещенность от одной лампы, а  $I_N$  — освещенность от  $N$  ламп. Тогда  $I_N = NI$ , так как  $/ = mK^2$ ,  $I_N = mK_N$  где  $m$  — коэффициент пропорциональности; выражая  $K_N K_N$  через  $/$  и  $I_N$ , получим  $K_N^2 = A\Gamma K^2$  и

$$K_N = |TN\kappa|.$$

Эти устройства, иногда называемые *светосинхронизаторами*, включают дополнительные импульсные осветители. Они приводятся в действие импульсом света от лампы, электрически связанной с фотоаппаратом. Для срабатывания светосинхронизатора необходимо, чтобы импульс света попадал в «поле зрения» светочувствительного элемента светосинхронизатора.

Рис. 10.10.

Вариант расположения импульсных осветителей относительно оптической оси объектива.



Этот тип устройств сконструирован как для электронных импульсных осветителей, так и для ламп-вспышек, хотя в последнем случае они менее надежны и мало распространены. Если импульсная осветительная лампа не расположена вдоль оптической оси объектива фотоаппарата, то эффективность освещения уменьшается. На рис. 10.10 плоский объект расположен перпендикулярно оси объектива фотоаппарата. Если угол между осью объектива и направлением освещения составляет  $\theta$ , то освещенность сцены пропорциональна  $\cos \theta$ , поскольку освещенная лампой площадь пропорциональна  $1/\cos \theta$ . Так как ведущее число пропорционально квадрату

освещенности, получим, что ведущее число импульсной осветительной лампы  $K_\theta$ , расположенной, как на рис. 10.10, равно

$$K_\theta = K V \cos \theta, \quad (10.6)$$

где  $K$  — ведущее число лампы при  $\theta = 0$ . Поскольку поверхности, близкие к идеально плоской, на практике встречаются

"Светосинхронизатор — электронное устройство, подсоединяемое непосредственно к дополнительным лампам, — включает эти лампы после попадания на него света от любого другого импульсного осветителя, например, установленного и подсоединеного непосредственно к фотокамере. Кроме того, для подсоединения нескольких импульсных ламп можно использовать специальный разъем, который с помощью длинного соединительного шнура подключается к синхроконтакту фотоаппарата — *Прим. перев.*

весьма редко, полученное выражение можно использовать только для оценочных расчетов. \*\*

**Пример 10.5.** Используются две импульсные лампы, „, которые имеют одинаковые ведущие числа, равные 150 для фотопленки чувствительностью 125 ASA. Если перед одной из них поместить рассеиватель (например, белый хлопчатобумажный платок), то освещение от лампы уменьшается наполовину. С помощью этих ламп производится портретная съемка в комнате среднего размера. Лампы установлены, как на рис. 10.10. Расстояния от объекта до фотоаппарата и ламп составляют 7 футов. Лампа, расположенная вблизи фотоаппарата, снабжена светорассеивателем. Угол  $\theta$  равен  $45^\circ$ . Определить ведущее число для этой системы. Какое значение диафрагменного числа необходимо использовать для фотопленки 125 ASA?

Ведущее число для импульсной лампы, расположенной вблизи фотоаппарата, из-за наличия рассеивателя уменьшается до  $150/AT \sim 106$  (одна ступень). Ведущее число основного источника света уменьшается до  $150 \cdot (\cos 45^\circ)^{1/2} = 150 \cdot 0,84 = 126$  [формула (10.6)]. Согласно уравнению (10.5), ведущее число системы ламп равно  $(126^2 + 106^2)^{1/2} = 165$ , а из уравнения (10.3) определим диафрагменное число  $f/ = 165/7 = 23$ . Следовательно, необходимо задиафрагмировать объектив до  $f/ = 22$ . Если же не учитывать поправку на рассеиватель, то ведущее число оказывается равным 210, а диафрагменное число составит 30, и в результате портрет будет недоэкспонирован приблизительно на одну ступень.

Импульсные осветители дают чрезвычайно «резкий» направленный свет, работа с которым требует осмотрительности. В примере 10.5 вместе с осветителем использовался свето-рассеиватель, уменьшающий «резкость» света. Вместо рассеивателя можно использовать светлую диффузно отражающую поверхность, на которую направляют импульсный осветитель (рис. 10.11). Такой поверхностью могут быть стена, потолок, зонтик или экран, смонтированные перед осветителем. В этом случае соотношение между ведущим числом, диафрагменным числом и расстоянием имеет вид  $K = 2(d_1 + d_2) \cdot f/$ , (10.7)

где  $d_1$  и  $d_2$  определяются согласно рис. 10.11. Коэффициент два введен для учета поглощения света отражающей поверхностью, а также диффузного характера отражения ею света. Выражение (10.7) приближенное, поскольку поправочный коэффициент зависит от свойств отражающей поверхности, и поэтому в большинстве случаев необходимо использовать так называемый метод «вилки»<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Когда фотограф недостаточно уверен в правильности выбранной JKСПО-зииции, используется метод «вилки». Для этого сначала снимается кадр при определенном тем или иным способом экспозиции, затем делаются

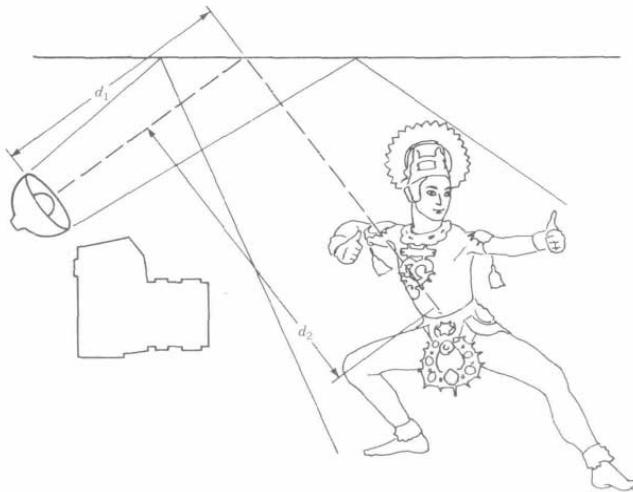


Рис. 10.11

Использование поверхности для отражения света импульсной лампы

**Пример 10.6.** Фотографируемый предмет находится в комнате с белым потолком, используемым в качестве отражателя для импульсного освещения. Предмет расположен в восьми футах от импульсного осветителя, а расстояния  $d_1$  и  $d_2$  составляют 5,5 фута. Ведущее число осветителя равно 150 для используемой фотопленки. Какое значение диафрагмы нужно выбрать при освещении предмета отраженным от потолка светом? Сравнить эти значения, соответствующие освещению

от потолка и прямому освещению объекта вспышкой.

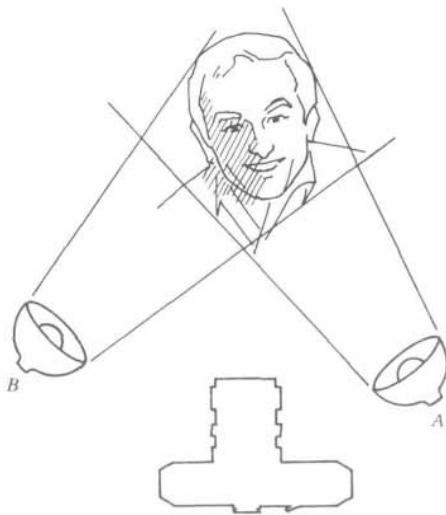
Из уравнения (10.7) получим  $\text{//} = 150/[2(5,5+5,5)] = 6,8$  для отраженной вспышки. Для прямого освещения вспышкой, используя равенство (10.3), найдем  $\text{//} = 150/8 = 19$ . Разность между полученными значениями  $\text{//}$  составляет приблизительно  $2\frac{1}{2}$  ступени, так как в первом случае диафрагма устанавливается в промежуточное положение между 5,6 и 8, а во втором случае — в положение 16. Из полученных результатов можно сделать вывод, что при отражении вспышки света от поверхности достигается более рассеянное освещение, но при этом существенно уменьшается глубина резко изображаемого пространства.

В некоторых случаях импульсное освещение используют в сочетании с имеющимся основным светом<sup>1</sup>. Свет, получаемый в этом случае от импульсного осветителя, обычно является заполняющим светом. Один из двух световых источников используется в качестве основного источника освещения, а другой дает заполняющий свет для подсветки теней. Отношение освещенностей будет определяться величиной, равной отношению количеств света, освещавшего самые светлые участки («света»), и самые темные участки предмета («тени»). Дополнительно два дублирующих кадра, экспозиции которых больше и меньше на одну ступень первоначальной экспозиции. В некоторых особенно сомнительных случаях экспозиционную «вилку» расширяют еще на одну ступень. Этим способом рекомендуется пользоваться фотографам-любителям. Профессионалы предпочитают делать пробные снимки. — Прим. перев.

<sup>1</sup>) Основной свет часто называют рисующим или ведущим светом — Прим. перев.

Рис. 11.12.

Использование второго осветителя для подсветки теневых участков объекта, образовавшихся при освещении основным источником света.



Например, на рис. 10.12 источник света  $A$  обеспечивает освещенность человека, в два раза большую по сравнению с источником  $B$ . Значит,  $A$  — источник основного или рисующего света, а  $B$  — заполняющего света. Левая часть лица будет освещена ярко, в то время как правая затенена. Отношение освещенностей составляет 3:1, так как и  $A$ , и  $B$  освещают светлую сторону лица, в то время как затененную часть освещает только источник  $B$ . В рассмотренном случае один из двух источников света может быть импульсным осветителем, а другой — лампой накаливания.

При использовании лампы-вспышки в качестве источника заполняющего света желательно иметь возможность управлять величиной отношения освещенностей. В

принципе это может быть осуществлено при работе либо с лампой-вспышкой типа М, либо с электронной импульсной лампой, которая предоставляет фотографу широкие возможности. Чтобы понять, как можно управлять освещением при использовании электронной импульсной лампы, вспомним, что продолжительность освещения этой вспышкой обычно составляет 1/1000 с. Так как большинство фотозатворов не обеспечивает времен экспонирования менее 1/1000 с, изменение скорости срабатывания затвора не влияет на экспозицию фотопленки при освещении вспышкой. В

случае шторного фотозатвора время экспонирования должно быть таким, чтобы фотозатвор был полностью открыт в течение 1/1000 с, когда вспышка освещает объект. Практически это означает, что выдержка должна составлять не менее 1/60 с для обычной 35-мм зеркальной одно-объективной фотокамеры со шторным фотозатвором (выдержка может быть короче, если затвор изготовлен из металлических ламелей). В связи с этим ограничением для регулирования на пленке экспозиции от имеющегося (помимо вспышки) освещения приходится пользоваться изменением выдержки независимо от экспозиции, которую дает вспышка. А с помощью диафрагмы можно изменить экспозицию фотопленки как от имеющегося помимо вспышки освещения, так и от освещения вспышкой. Следовательно, экспозиция от электронной вспышки должна устанавливаться изменением диафрагмы объектива, а изменением выдержки регулируется экспозиция от остальных источников света («имеющегося света»), при этом выдержка должна быть согласована с установленным значением диафрагмы. Удобным способом выбора правильной экспозиции является коррекция ведущего числа вспышки и светочувствительности фотопленки в единицах ASA таким образом, чтобы полная освещенность светлого участка предмета, созданная двумя источниками света одновременно, приводила к его правильной экспозиции, а заполняющий свет обеспечивал необходимое отношение освещенностей. Если имеющийся свет является основным источником, то значения поправочных коэффициентов для ведущего числа и светочувствительности фотопленки можно определить из табл. 10.3 для выбранного отношения освещенностей. Данные табл. 10.4 относятся к случаю, когда основным источником является импульсное освещение. Используя скорректированное значение ведущего числа, можно определить значение диафрагмы. Измеряя затем экспонометром имеющийся свет и используя скорректированное значение светочувствительности в единицах ASA, можно определить правильное время выдержки. Экспозицию можно также найти с помощью экспонометрической таблицы (гл. 2), основываясь на скорректированном значении светочувствительности пленки.

**Таблица 10.3. Поправочные коэффициенты для определения ведущего числа  $A'$  и светочувствительности фотопленки в единицах ASA, если основным светом является естественное освещение**

| Отношение<br>освещенно-<br>стей (конт-<br>раст осве-<br>щения) | Относительная интенсивность<br>источников<br>естествен-<br>ный | импульс-<br>ная под-<br>светка | Коэффи-<br>циент<br>при $A$ | Коэффициент<br>при<br>светочувстви-<br>тельности<br>в единицах<br>ASA |
|--|--|--------------------------------|-----------------------------|---|
| 2:1  | 1  | 1                              | $A/T \sim 1,4$              | 2   |
| 3:1  | •2   | 1                              | $\sqrt{T} \ll 1,7$          | $3/2 = 1,5$   |
| 4:1  | 3  | 1                              | $V^{\wedge} = 2$            | $4/3 \ll 1,3$   |
| 5:1  | 4  | 1                              | $VT - 2,2$                  | $5/4 \ll 1,2$   |

**Таблица 10.4. Поправочные коэффициенты для определения ведущего числа  $K$  и светочувствительности фотопленки в единицах ASA, если основным светом является импульсный источник света**

| Отношение<br>освещенно-<br>стей | Относительная<br>интенсивность<br>источников | Коэффи-<br>циен-<br>т при $A$ | Коэффициент<br>при светоч-<br>вите.льности<br>пленки в<br>единицах<br>ASA |
|---------------------------------|--|-------------------------------|---|
| 1,1п                            | естес-<br>венный                             |                               |   |

|            |     |     |   |   |   |       |     |                |     |
|------------|-----|-----|---|---|---|-------|-----|----------------|-----|
| 2:1        | 3:1 | 4:1 | 1 | 1 | 2 | L/T-  | 1.4 | V3             | ->  |
| 5:1        |     |     |   | 1 | 3 | 1     | 4   | /2~ 1.2 V 4 /3 | 3 4 |
|            |     |     |   |   |   | ~ 1.1 |     |                | 5   |
| <hr/>      |     |     |   |   |   |       |     |                |     |
| V 5/4= 1.1 |     |     |   |   |   |       |     |                |     |

Если в качестве источника заполняющего света используются лампы-вспышки типа М, то время экспонирования должно быть больше чем 1/30 с. поскольку это время приблизительно составляет время горения лампы. При таком значительном времени экспонирования лампы-вспышки типа М можно использовать в качестве источников заполняющего света при фотографировании со штативом статических объектов

Поскольку ведущее число равно произведению диафрагменного числа на расстояние между лампой и объектом, экспозицию в случае импульсного освещения удобнее устанавливать путем изменения расстояния от лампы до объекта, а не диафрагменного числа. При этом поправочные коэффициенты совпадают с коэффициентами, приведенными в табл. 10.3 и 10.4. Так как расстояние между лампой и объектом не определяется положением фотокамеры, часто возникают трудности при подсоединении осветителя к фотокамере. Обычно для этого используют либо длинный синхронизирующий кабель, либо све-тосинхронизатор, который подсоединен ко второй лампе-вспышке, расположенной вдали от фотоаппарата. Для крепления осветителей часто используют различные штативы, но можно воспользоваться и помощью ассистента. Однако этот путь позволяет избежать некоторых ограничений использования электронной импульсной лампы с фотокамерами, снабженными шторными затворами. Кроме того, выдержки должны быть не короче 1/60 с для матерчатых шторных затворов (могут быть короче для металлических затворов). Однако использовать выдержки, более длинные, чем 1/60 с, нет необходимости, поскольку путем выбора диафрагменного числа можно достичь правильной экспозиции, соответствующей освещенности, создаваемой основным светом, а путем изменения расстояния лампа—объект можно получить необходимую освещенность от импульсного источника. Для импульсного осветителя с регулируемой мощностью

вместо изменения расстояния от лампы до объекта можно изменять мощность лампы. У некоторых электронных импульсных ламп есть специальные переключатели мощности вспышки, которые позволяют установить значения  $V_2$ ,  $V_4$ ,  $V_8$  и т. д. полной мощности. Регулировка автоматических импульсных осветителей может осуществляться путем установки величин светочувствительности, отличных от чувствительности фотопленки, заряженной в фотокамере. Если импульсный осветитель дает слишком мощную вспышку, для уменьшения освещенности можно воспользоваться *нейтрально-серым светофильтром* либо светорассеивателем, который помещается перед лампой.

**Пример 10.7.** Воспользуемся в качестве источника заполняющего света электронным импульсным осветителем, ведущее число которого (в футах) составляет 75 для пленки 125 ASA. Осветитель закрыт белым платком для рассеивания света, и ситуация аналогична показанной на рис. 10.12. Лампа накаливания, дающая основной свет, соответствует источнику A, а импульсный осветитель с фильтром, создающий заполняющий свет, — источнику B. Желаемое отношение освещенностей составляет 3:1. Расстояние от импульсного осветителя до объекта составляет 6 футов. Экспонометрическое показание только для лампы накаливания соответствует факторам экспозиции 1:11 и 1/125 с. Найти соответствующее диафрагменное число и выдержку для указанного примера с использованием заполняющего импульсного света.

Из табл. 10.3 найдем, что скорректированное ведущее число равно  $75 \cdot 1,7 = 128$ . Так как расстояние лампа—объект равно 6 футов, то диафрагменное число будет равно  $128/6 = 21,3 \sim 22$ . Повторно воспользовавшись табл. 10.3, найдем скорректированную светочувствительность  $125 \cdot 1,5 = 188$  ASA. Надо учесть, что когда речь идет об основном освещении, мы переходим от фотопленки чувствительностью 125 ASA к пленке 188 ASA. Соответственно экспозиция должна уменьшиться в 125/188 раз. Таким образом, факторы экспозиции должны быть 1:11 и 1/188 с. Следовательно, правильные доступные факторы экспозиции составят 1:11 и 1/250 с. Используемому импульсному освещению соответствует диафрагменное число 22; поэтому, для того чтобы экспозиция была совместима с обоими источниками света, необходимо использовать факторы экспозиции 1:22 и 1/60 с. Эта экспозиция может быть использована как со шторным, так и с центральным фотозатвором при условии, что объектив может быть защищен от света диафрагмирован в отношении 1:22. Обычно столь малое значение относительного отверстия диафрагмы требуется при портретной съемке. Поскольку возможность выбора экспозиции ограничена дискретным набором диафрагменных чисел и выдержек, используемое приближение должно соответствовать фотографической широте фотопленки. Для этого сначала определяется диафрагменное число, а затем выдержка независимо от того, является ли импульсный свет заполняющим или основным светом.

**Пример 10.8.** Предположим, что фотографируется человек вне помещения в пасмурный день (светлая облачность) на фотопленку 125 ASA. Фотограф выбрал отношение освещенно-стей 2:1, а в качестве заполняющего света — естественное освещение. Основной свет дает импульсный осветитель с ведущим числом 150 (в футах). Фотоаппарат снабжен шторным фотозатвором, синхронизация которого с электронной вспышкой осуществляется при выдержке короче 1/60 с. Определить, на каком расстоянии от предмета должна быть расположена импульсная лампа, чтобы получить требуемую экспозицию.

Поскольку варьируется расстояние от лампы до предмета, сначала определим экспозицию, соответствующую естественному свету. Воспользовавшись экспонометрическими таблицами (гл. 2), найдем, что для основного света факторы экспозиции составляют 1:8 и 1/125 с. Из табл. 10.4 найдем, что светочувствительность пленки должна быть равна  $125 \cdot 2 = 250$  ASA. Следовательно, скорректированная экспозиция для основного света соответствует диафрагменному числу 8 и выдержке 1/250 с. Так как экспозиция должна быть синхронизирована с электронной вспышкой, то искомыми факторами экспозиции будут 1:16 и 1/60 с. Скорректированное ведущее число равно  $150 \cdot 1,4 = 210$ , а расстояние между лампой и предметом составляет  $210/16 = 13$  футов. Если же выполняется портретная съемка, то расстояние от фотокамеры до человека будет составлять около 6 футов, а импульсная лампа не может быть расположена около аппарата. В этом случае можно воспользоваться нейтральным светофильтром либо светорассеивающим экраном для уменьшения ведущего числа в два раза; тогда импульсный осветитель можно установить приблизительно на том же расстоянии от предмета, что и фотоаппарат.

Важно отметить, что намного проще определить положение источника заполняющего света с помощью фотовспышки. Этот прибор позволяет определить экспозицию исходя из светочувствительности фотопленки в единицах ASA, и на нем необходимо устанавливать чувствительность, умноженную на квадрат коэффициентов для ведущих чисел, указанных в табл. 10.3 и 10.4. Так как автоматическая импульсная лампа управляет датчиком отраженного света, который функционирует подобно измерителю отраженного света, те же самые коэффициенты могут быть использованы при корректировке таких ламп, создающих заполняющий свет.

### Необычные условия освещения

Иногда встречаются такие условия освещения, для которых очень трудно определить правильную экспозицию. Некоторые из них приведены в табл. 10.5, причем величины факторов экспозиции получены опытным путем для фотопленки чувствительностью 400 ASA. При использовании фотопленки другой

чувствительности скорректированные факторы экспозиции обсчитаны пропорциональны отношению чувствительности используемой пленки к величине 400 ASA. Приведенные в табл.

**Таблица 10.5. Таблица экспозиций при различных условиях освещения для черно-белой фотопленки 400 ASA**

| Объект  | Выдержка, с | Диафрагменное число |
|---|-------------|---------------------|
| Ярко освещенные уличные сцены ночью               | 1/30        | 2,8                 |
| Неоновая и другая электрическая реклама (надписи) | 1/30        | 5,6                 |
| Витрины магазинов                                 | 1/30        | 4                   |
| Освещенные прожектором здания                     | 4           | 8                   |
| Уличная праздничная иллюминация                   | 3           | 11                  |
| Праздничное освещение внутри помещений            | 1           | 16                  |

|                                     |         |                  |
|-------------------------------------|---------|------------------|
| Костры, пожары                      | 1/60    | 4                |
| Пейзажи, освещенные луной           | 420     | 4                |
| Ярко освещенные комнаты             | 1/60    | 2,8              |
| Обычное вечернее освещение комна-   | 1/30    | 2                |
| ты, освещение в церкви, школьном    |         |                  |
| классе                              |         |                  |
| Представление на льду, прожектор-   | 1/125   | 5,6              |
| ное освещение                       |         |                  |
| Представление на льду, заливающее   | 1/60    | 4                |
| освещение                           |         |                  |
| Фейерверки рядом с яркими сценами   | 1/125   | 16               |
| Фейерверки                          | Время   | 16               |
|                                     | вспышки |                  |
| Освещенные фонтаны                  | 1       | 2,8              |
| Телевизионный экран                 | 1/30    | 3,5              |
| Спортивные соревнования в зале      | 1/60    | 2,8              |
| Футбол при электрическом освеще-    | 1/125   | 2,8              |
| нии                                 |         |                  |
| Спортивная борьба и бокс            | 1/125   | 4                |
| Театральное представление           | 1/60    | "7 и<br>,0       |
| Цирк при прожекторном освещении     | 1/125   | 4                |
| Цирк, залитая светом арена          | 1/60    | 2.8              |
| Заход солнца, солнце над горизонтом | 1/60    | 5,6 <sup>a</sup> |
| Заход солнца, солнце за горизонтом  | 1/30    | 2,8 <sup>a</sup> |
| Предмет, освещенный р\чпым фонा-    | 1/15    | M                |
| рем с расстояния 5 м                |         |                  |
| Предмет, освещенный горящей све-    | 1/15    | M                |

чай или спичкой

<sup>1</sup> Используется красным светофильтром

10.5 данные следует рассматривать как ориентировочные для определения правильной экспозиции; при этом желательно применять метод «вилки». В ряде случаев весьма полезным является экспериментальное определение экспозиции.

### Упражнения

1. Голубое небо имеет цветовую температуру 12 000 К. Какой длине волн соответствует максимум кривой излучения абсолютно черного тела при этой температуре?
2. Цветовая температура неба, покрытого облаками, лежит в пределах 7500—8400 К. Переведите эти температуры в майрэды и определите интервал между ними.
3. Какой из следующих источников света обладает максимальным излучением голубого света в своем спектре: 1) прямой солнечный свет в полдень, 2) солнечный свет со светом от ясного неба в полдень, 3) открытая тень в ясный день?
4. Сравните спектры дневного света и излучения флуоресцентной лампы дневного света.
5. Применим лампу-вспышку 5В (тип М) вместе с фотоаппаратом со шторным затвором. Время экспонирования 1/1000 с (1 мс). Синхронизация фотоаппарата соответствует 1/60 с. С помощью рис. 10.3 определить относительную освещенность на краях объекта по сравнению с центральной частью, если была применена FP-синхронизация.
6. Почему шторный затвор менее удобен, чем центральный, при использовании с импульсным осветителем?
7. Ведущее число импульсного осветителя для фотопленки 125 ASA равно 100 (в футах). Определить ведущее число этой лампы для фотопленки чувствительностью 64 ASA. Найти значения  $K$  в метрах.
8. Имеются два импульсных осветителя, ведущие числа которых равны 200 (в футах). Чему равно их общее ведущее число, если они освещают объект, как показано на рис. 10.9 (полное перекрывание)?
9. Для фронтального освещения объекта, расположенного на расстоянии 18 футов от импульсного осветителя, используется лампа с ведущим числом 200 (в футах). Какое диафрагменное число необходимо использовать для оптимальной экспозиции? Если импульсный осветитель закрывается белым платком, то объектив должен быть от крыт на одну ступень. Чему равно ведущее число осветителя в этом случае?
10. Ведущее число импульсного осветителя для фотопленки 125 ASA равно 60 (в метрах). Объект освещается от потолка светом осветителя (рис. 10.11). Расстояние от лампы до потолка приблизительно равно расстоянию от потолка до объекта (2 м). Какое нужно установить диафрагменное число, чтобы получить правильную экспозицию?
11. Рассмотреть ситуацию, аналогичную описанной в примере 10.6. Взять отношение освещенностей 2:1 вместо 3:1. Определить факторы экспозиции для этого случая. Будут ли они пригодными, если используется фотоаппарат со шторным затвором?
12. Рассмотреть ситуацию, аналогичную описанной в примере 10.8, если отношение освещенностей равно 4:1. Определить правильную экспозицию и положение импульсного осветителя для этого случая.
13. Фотографируется фейерверк на цветную фотопленку чувствительностью > ASA. Какую необходимо использовать экспозицию?

## Глава 11. Цвет

В гл. 12 будут изложены основные вопросы цветной фотографии вместе с практическими рекомендациями. Предварительно необходимо рассмотреть представления о физической природе света и цвета, а также основы зрительного восприятия цвета. При этом мы в основном будем пользоваться общепринятыми понятиями, но, поскольку нас интересует проблема цвета с точки зрения цветной фотографии, в некоторых случаях будем допускать упрощения. Более подробно читатель может познакомиться с этими вопросами в книгах<sup>1</sup>.

### Цветные объекты

Вероятно, большинство случаев образования окраски предметов в природе связано с *поглощением* света. Если белый свет освещает красящее вещество (*пигмент*) и если поглощается весь свет, кроме некоторой его части, например красной, то такой пигмент называется красным. В этом процессе поглощаемый свет возбуждает молекулы красящего вещества, энергия возбуждения которых затем переходит в тепло. Строгое объяснение механизма поглощения основывается на понятиях современной физики. Однако самые общие черты этого процесса аналогичны раскачиванию ребенка на качелях (рис. 11.1). Если ребенка подталкивать всякий раз, когда качели достигают верхней точки, то раскачивание будет непрерывно продолжаться. Частота подталкиваний определяется собственной частотой качелей с ребенком (подобно маятнику). Если же качели толкать с любой другой частотой, то вся энергия, сообщаемая качелям, будет теряться. Подобным образом ведут себя и молекулы, ответственные за

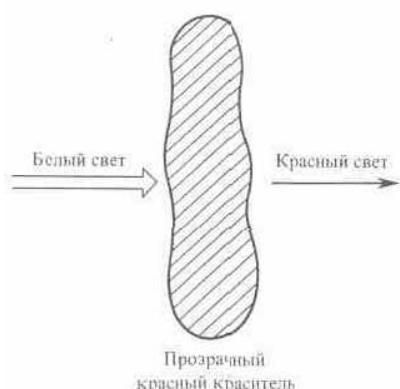
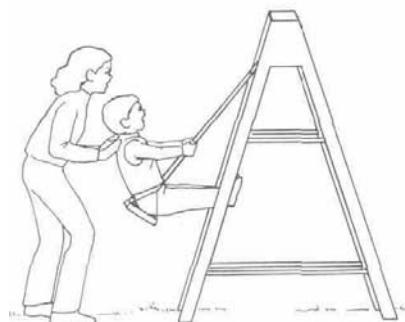
цвета красителей, только их «качели» гораздо более сложные. Эти молекулы способны поглощать энергию света только определенных частот, остальной же свет не поглощается и, следовательно, свободно проходит сквозь краситель (рис. 11.2).

Если непрозрачную белую отражающую поверхность (например, лист белой бумаги) покрыть красным красителем, подобным тому, который используется в фотографии, и освещать белым светом, то лист бумаги будет казаться красным (рис. 11.3).

<sup>1)</sup> Williamson S. J., Cummins H. Z. Light and Color in Nature and Art, New York: John Wiley, 1981; Le Grand Y. Light, Color and Vision, London: Chapman and Hall, Ltd., 1968.

Рис. 11.1.

Явление резонанса при раскачивании ребенка на качелях.



В этом случае происходит полное поглощение всего света, кроме красного, который отражаясь от подложки, выходит наружу и дает красную окраску бумаге. Если же этим красителем покрыть черную поверхность, то красный свет, прошедший краситель, будет поглощаться черной поверхностью, и поверхность будет казаться черной. Некоторые красители выглядят непрозрачными. Пигмент большинства красящих материалов представляет собой непрозрачные макрочастицы, которые частично отражают, пропускают и рассеивают свет видимой части спектра. Пигмент поглощает все цвета, кроме некоторого. Поглащающие молекулы большинства встречающихся в природе естественных пигментов находятся в *рассеивающих* свет частицах вещества.

Эффект светорассеяния также может приводить к образованию окраски. При пропускании света через газ падающая электромагнитная волна возбуждает в его молекулах колебания электронов. Колеблющиеся электроны порождают вторичное электромагнитное излучение той же самой частоты, что и исходное. Интенсивность излучения, испускаемого в данном направлении, зависит от характеристик падающего света, а

Рис. 11.2.

Получение красного света при пропускании белого света через красный краситель.

Рис. 11.3.

Отражение красного света от белой поверхности, окрашенной красным красителем

также от строения молекулы. Рассмотренное рассеяние света молекулами газа (*рэлеевское рассеяние*) может приводить к возникновению цвета, поскольку интенсивность рассеянного света изменяется обратно пропорционально четвертой степени длины волны при условии, что размер молекулы мал по сравнению с длиной волны. Благодаря этому эффекту дневное небо кажется голубым, а закат — красным. Днем молекулы освещены солнцем так (рис. 11.4, а), что рассеивают главным образом голубой свет, который, дойдя до наблюдателя, создает видимость голубого неба. Во время захода солнца (рис. 11.4, б) вновь преимущественно рассеивается голубой свет, а сквозь атмосферу проходит красный свет.

Если размер рассеивающих частиц велик по сравнению с длиной световой волны (как в случае зерен наполнителя в краске), то рассеяние не зависит от длины волны и не происходит изменения цвета благодаря рассеянию. Объекты также могут приобретать окраску вследствие люминесценции. При рассмотрении в гл. 9 люминесцентного

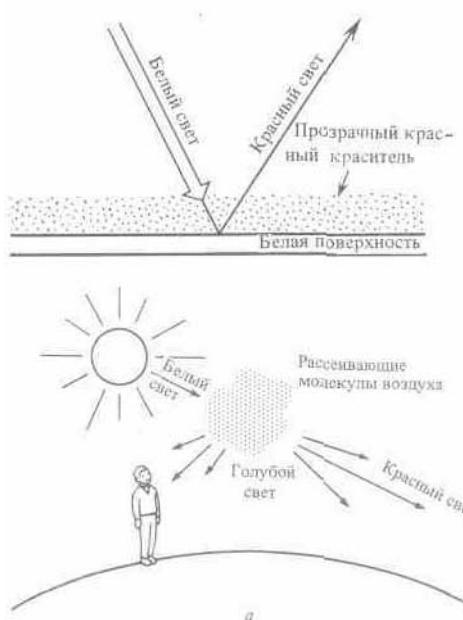


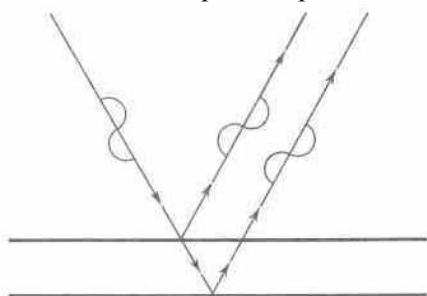
Рис. 11.4.

Возникновение голубой и красной окраски неба в полдень (а) и при

заходе солнца (б) соответственно (дневного) света отмечалось, что ультрафиолетовое излучение возбуждает люминофоры, которые излучают свет видимой части спектра. Существуют так называемые люминесцентные красители, которые при освещении светом определенного цвета излучают свет другого цвета. В качестве примера приведем мужские белые рубашки, большинство которых, будучи освещенными в темной комнате ультрафиолетовым светом (так называемый «черный свет»), начинают светиться голубовато-белым светом, в то время как остальные предметы в темноте едва заметны. Ткань, из которой сшиты эти рубашки, обрабатывается люминесцентным красителем, который под действием ультрафиолетового излучения солнца испускает белый свет, создавая ощущение интенсивной белизны. Некоторые моющие средства содержат добавки люминесцентных веществ, усиливающих этот эффект. Длина волны излучения, возбуждающего люминесценцию, должна быть короче (энергия излучения больше) длины волны люминесценции. Другими словами, фотоны, обладающие более высокой энергией, возбуждают молекулы красителя, излучающие фотоны с более низкой энергией.

При изложении проблемы просветления объективов в гл. 4 было показано, что толщина пленочного покрытия, наносимого на линзы, должна быть такой, чтобы волны, отраженные от двух соседних границ раздела сред, интерферировали, уничтожая друг друга и таким образом уменьшая общее отражение от поверхности линз. Если же толщина покрытия подобрана так, что, что волны, интерферируя, складываются (рис. 11.5), то происходит усиление определенного цвета. Этот эффект объясняет появление окраски у мыльных пузырей и пленок масла на воде. Поскольку такие пленки редко имеют одинаковую толщину, обычно наблюдается их радужная окраска.

Как отмечалось в гл. 4, для получения различных цветов можно воспользоваться стеклянной призмой, разлагающей белый свет в спектр. При рассмотрении поглощения света предполагалось, что поглощающее вещество является изолятором, т. е. в нем отсутствуют свободные электроны. Если же вещество является электрическим проводником, в котором электроны свободно блуждают и перемещаются в пределах кристаллической решетки, то поглощения света может не происходить. Свет, освещающий проводник, не проникает в глубь него, поскольку наличие свободных электронов приводит к отражению.



Пример положительной интерференции волны при отражении от двух близлежащих поверхностей.

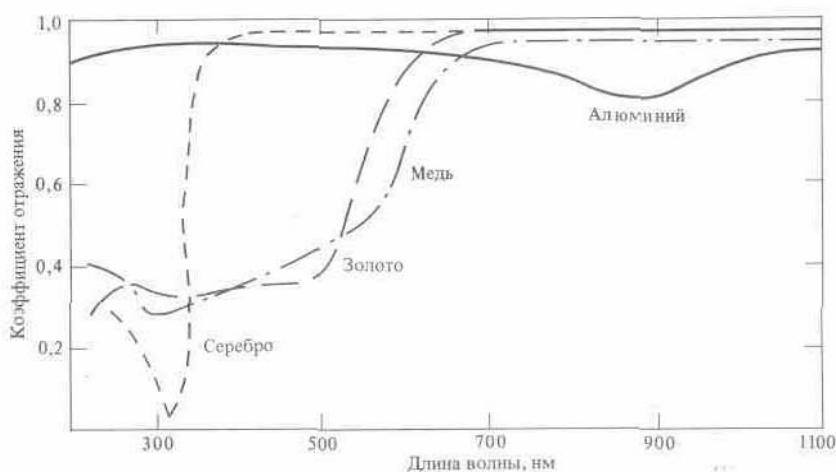
Рис. 11.6.

Зависимость коэффициента отражения некоторых металлов от длины волны падающего света.

нию оптического излучения без его поглощения<sup>1\*</sup>. Если излучение отражается одинаково для любых длин волн видимой части спектра, то поверхность выглядит белой. Если же коэффициент отражения при определенных длинах волн

превышает его значения для других длин волн, то поверхность будет выглядеть окрашенной. Вот почему золото имеет желтый цвет, медь — красный, а серебро и алюминий — белый (рис. 11.6). Подобным же образом ведут себя краски на основе металлов.

**Источники света и цвет**  
Наблюдаемый цвет предмета зависит не только от спектральных характеристик красителя, которым он покрыт, но также от спектральных



характеристик падающего светового потока. Красный объект, освещенный красным или белым светом, будет восприниматься красным. Синий предмет при освещении белым светом воспринимается синим, а при освещении красным светом — черным.

В гл. 10 были рассмотрены наиболее распространенные в черно-белой фотографии источники света, а

также спектральный состав света, излучаемого этими источниками. Кроме того, было отмечено, что в цветной фотографии спектральный состав света играет важную роль. На рис. 10.2 представлено спектральное распределение света флуоресцентной лампы (лампы дневного света), которое дает наглядное представление о составе светового потока, используемого для освещения окрашенных объектов и особенно для точной цветопередачи лиц смуглых людей. Максимум непрерывного распределения (около 465 нм) достаточно хорошо соответствует максимуму кривой излучения абсолютно черного тела при температуре 6000 К, которая примерно равна цветовой температуре прямых лучей

" Коэффициенты отражения света для металлов высокой чистоты близки к единице. — *Прим. перев.* солнца и ясного или покрытого легкими облаками неба<sup>1</sup>). Даже если предмет окрашен таким образом, что он поглощает или отражает свет с одной или более длинами волн, соответствующих линиям спектра флуоресцентной лампы, то цвет предмета при его освещении флуоресцентной лампой будет значительно отличаться от цвета при естественном дневном освещении. При рассматривании фотографии это отличие может быть и не замечено вследствие адаптации глаза и «короткой» зрительной памяти. Идентификация цветов облегчается в случае фотографирования объекта, освещенного отдельно каждым из источников света, и при сравнении полученных фотографий. Хотя освещение флуоресцентной лампой и создает некоторые необычные цветовые эффекты, изменяющаяся цветовая температура лампы накаливания может приводить к ощущенным изменениям цвета, особенно при сравнении фотографий. Так, например, при визуальном сравнении загорелого лица одного и того же человека, освещенного лампой накаливания или дневным светом, не возникает впечатления «румянного» лица в первом случае, как это имело бы место при сравнении фотографий.

### **Восприятие цвета**

Человеческий глаз воспринимает свет с любыми длинами волн между 400 и 700 нм. Цвета большинства предметов соответствуют одной или нескольким сплошным полосам частот видимого спектра. Глаз воспринимает цвета вследствие ответных реакций (возбуждений) колбочек (гл. 6), расположенных на сетчатке (дневное зрение). Принято считать, что глаз способен различать цвета в зависимости от относительного возбуждения трех различных типов колбочкообразных нервных клеток (рис. 6.5), которые называются синими (кривая спектральной чувствительности (С), зелеными (З) и красными (К) колбочками. Если зеленый свет с длиной волны около 540 нм освещает глаз, то возбуждение синих колбочек будет наименьшим, зеленых — наибольшим, а возбуждение красных колбочек — промежуточным. Эти возбуждения в виде электрических сигналов передаются головному мозгу, где идентифицируются в виде зеленого цвета. Глаз можно рассматривать как «мост» между физическим миром цвета, инициированного видимой частью электромагнитного спектра, и ощущением цвета. Однако наличие в глазу только трех типов колбочек имеет важное значение с точки зрения способов получения цветных пигментов, красок и систем регистрации цветных изображений (например, цветной фотографии).

При описании цветов видимой части спектра обычно приводят шесть различных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий и фиолетовый<sup>2</sup>). Эти цвета принято называть *тонами*. Однако многие считают, что оранжевый тон представ-

" См. табл. 10.1 — *Прим. перев.*

<sup>2</sup>> Часто приводят и седьмой цвет — голубой — *Прим. перев.*

ляет собой комбинацию красного и желтого, а фиолетовый — красного и синего. Поэтому их число может быть уменьшено до четырех<sup>1, ^</sup>. Красная часть видимого спектра состоит из большого числа чистых спектральных цветов различных длин волн<sup>2</sup>), которые называются красными. Два спектрально чистых окрашенных луча света одной и той же длины волны могут восприниматься как разные в зависимости от их яркости (так называемая светлота цвета). Два цвета могут различаться еще и другим способом. Один цвет может быть идентифицирован по сравнению с другим как более чистый; более чистый цвет может быть назван более насыщенным. Это отличие в насыщенности является следствием смешения белого цвета со спектрально чистым окрашенным светом.

Цвет предметов может быть описан с использованием этих же основных характеристик, за исключением *светлоты*, вместо которой часто используется *яркость*. Когда два тела одинакового тона отличаются по яркости, более яркий тон будет значительно отличаться от соответствующего нейтрального серого цвета, чем менее яркий. Некоторые исследователи (см., например, работу<sup>3</sup>)) считают, что ощущение света нельзя адекватно описать с помощью только трех характеристик (тон, яркость и насыщенность). Например, они полагают, что цвет объекта зависит от окраски окружающих предметов.

### **Основные цвета**

Юнг (1773—1828) и Максвелл (1831—1879) показали, что если взять три цветных световых луча со значительно различающимися длинами волн и совместить их на белой поверхности в соответствующих пропорциях, то можно в результате получить белый свет. Можно подобрать много различных

комбинаций цветных лучей, таких, что результирующий свет будет белым. Каждый из составляющих лучей принято называть *основным*, или *первичным*. Смешивая основные цвета в соответствующих пропорциях, можно получать самые разнообразные цвета, и поэтому они иногда называются *аддитивными* первичными цветами. Тот факт, что три основных цвета, смешиваясь, образуют большинство остальных цветов, несомненно является следствием механизма восприятия цвета и, вероятно, объясняется различными спектральными чувствительностями каждой из трех групп колбочек. Совсем необязательно, чтобы основными цветами были те, которые представляются как красный, зеленый или синий. (Многие художники относят к первичным цветам красный, желтый и синий.) Ни один из основных цветов не является совершенно спектрально чистым, и не следует ожидать, что в самом деле число цветовых тонов значительно больше. Нормальный глаз человека способен различать в спектре около 180 цветовых тонов. — *Прим. перев.*

<sup>2</sup>> Цвета, определяемые одной длиной волны, называются монохроматическими. — *Прим. перев.*

<sup>3</sup>> Evans R. M. *The Perception of Color*, New York: John Wiley, 1974, p. 83ff.

дать, что каждый основной цвет возбуждает только одну из трех групп колбочек.

Цвета, которые считаются красными, группируются в области длин волн около 650 нм, зеленые — около 530 нм, а синие — около 485 нм. Из рис. 6.5 видно, что красный основной цвет возбуждает рецепторы колбочек красного и зеленого цвета, а синий и зеленый цвета воздействуют на все типы колбочек. Однако чувствительности каждого вида колбочек не одинаковы для каждого основного цвета.

В большинстве случаев для данного спектрального цвета существует такой второй цвет, добавление которого к первому приводит к образованию белого цвета. (Красители, применяемые в фотографии, и свет цветных осветителей ведут себя подобным образом.) Такие пары цветов называются *дополнительными*. Например, дополнительным цветом к синему является желтый, к красному — голубой, к зеленому — пурпурный. Хотя пурпурного цвета нет в спектре, он может быть получен при смешении красного и синего цветов. Цвета, дополнительные к первичным, называются *отрицательными* или *субтрактивными* основными цветами. Субтрактивные цветные светофильтры вычитают из пучка белого света дополнительный к основному цвету.

Взаимосвязь между основными и дополнительными субтрактивными цветами становится очевидной при рассмотрении следующих соотношений:

$$\text{красный} + \text{зеленый} + \text{синий} = \text{белый}, \quad (11.1)$$

$$\text{белый} - \text{синий} = \text{красный} + \text{зеленый} = \text{желтый}, \quad (11.2)$$

$$\text{белый} - \text{зеленый} = \text{красный} + \text{синий} = \text{пурпурный}, \quad (11.3)$$

$$\text{белый} - \text{красный} = \text{зеленый} + \text{синий} = \text{голубой}. \quad (11.4)$$

Соотношение (11.1) показывает, что в результате сложения трех основных цветов образуется белый цвет. Из соотношения

(11.2) видно, что вычитание синего цвета из белого дает красный и зеленый, т.е. дополнительным цветом к синему является смесь этих двух цветов, т.е. желтый. Аналогично соотношения (11.3) и (11.4) связывают зеленый и красный цвета с дополнительными к ним цветами.<sup>1</sup>)

Основные цвета и субтрактивные основные цвета<sup>2</sup>) могут быть также рассмотрены с точки зрения законов поглощения. Если один из трех светофильтров, окрашенных в один из основных цветов — красный, зеленый или синий, — расположить на

<sup>1</sup>> Получение цвета путем аддитивного смешения первичных цветов (например, при сложении красного и зеленого получается желтый) называется аддитивным синтезом цвета. Получение цвета путем вычитания из белого цвета какого-либо цвета, поглощаемого средой-субтрактором, называется субтрактивным выделением цвета. — *Прим. перев.*

<sup>2</sup>> Субтрактивные основные цвета иногда называют минус-синий (желтый), минус-зеленый (пурпурный) и минус-красный (голубой). — *Прим. перев.*

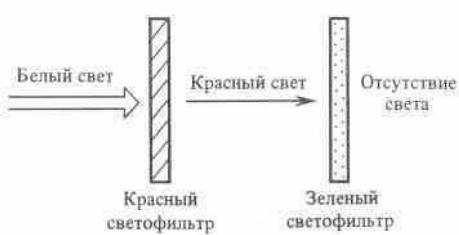


Рис. 11.7.

Полное поглощение белого света при последовательном прохождении через два светофильтра разных основных цветов.

пути пучка белого света, то будет выделен один из основных цветов. Однако если поместить перед источником света два любых светофильтра, то свет не будет проходить. Это происходит потому, что каждый светофильтр поглощает два других основных цвета. Например, красный светофильтр

поглощает зеленый и синий, зеленый — красный и синий. Таким образом, два светофильтра разных основных цветов не пропускают света (рис. 11.7). Если же окраска светофильтров соответствует субтрактивным цветам, то получим другие результаты. Если три светофильтра этого типа поместить перед источником белого света так, чтобы они частично перекрывали друг друга, то через неперекрытую часть каждого светофильтра будет проходить один из субтрактивных основных цветов. Через перекрытые двумя любыми светофильтрами участки будет проходить один из основных цветов, а в

случае перекрывания всех трех фильтров свет не будет проходить. Для пояснения этого факта рассмотрим следующий пример.

**Пример 11.1.** Показать, что светофильтры, окрашенные в субтрактивные цвета, могут выделять из белого света основные цвета. Как получить черный цвет, используя эти светофильтры?

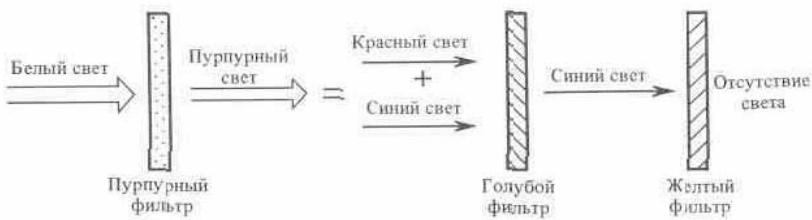
Из рис. 11.8 понятно, как желтый и пурпурный светофильтры выделяют из белого света красный. Если



пурпурный светофильтр заменить на голубой (рис. 11.9), то результирующий цвет будет зеленым. Если же совместить пурпурный и голубой светофильтры, то проходящий свет будет синим.



Рис. П.8.  
Получение красного света при пропускании белого  
через желтый и пурпурный светофильтры.  
Получение зеленого света при пропускании белого  
света через желтый и голубой светофильтры.



**Рис. 11.10.**  
Получение синего света при пропускании белого света через пурпурный и голубой светофильтры и полное поглощение света при использовании трех субтрактивных светофильтров

Составленные вместе все три фильтра не будут пропускать

свет, т. е. дадут черный цвет (рис. 11.10).

В цветной фотографии — как в цветных диапозитивах, так и в цветных фотобумагах — используются субтрактивные красители<sup>1</sup>. В случае цветных фотобумаг красители наносятся на белую бумажную основу, и цвета будут образовываться в отраженном свете (рис. 11.3). Использование красящих веществ основных цветов (красный, зеленый и синий) не может привести к удовлетворительным результатам, поскольку смесь любых двух перемешанных красящих агентов не будет пропускать свет (рис. 11.7). Если же два красителя основных цветов смешиваются таким образом, что частицы каждого из них закрывают свет, отраженный частицами другого красителя, и, кроме того, размер частиц достаточно мал, так что глаз их не различает, то красители могут использоваться для создания новых цветов.

В качестве примера использования аддитивного принципа синтеза цветов с помощью основных цветов можно привести формирование изображения на цветной телевизионной трубке. Экран кинескопа представляет собой набор большого числа очень маленьких цветных ячеек (пятнышек — красных, зеленых и синих) люминофоров, которые при возбуждении создают цветное изображение предметов. Например, если какая-то часть сцены имеет желтый цвет, то возбуждаются только люминофоры красного и зеленого цветов, а синего не возбуждаются. Поскольку каждое пятнышко люминофора в отдельности не разрешается глазом с обычного расстояния наблюдения, то красный и зеленый цвета вместе будут давать желтый цвет. Рассматривая экран кинескопа через небольшую лупу, можно увидеть пятнышки люминофоров в отдельности.

## **Системы классификации цветов**

Как упоминалось выше, необходимы по крайней мере три характеристики (тон, яркость или светлота и насыщенность) для описания цвета. Обычно для идентификации цвета используются различные названия. Например, розовый означает очень светлый ненасыщенный оттенок красного, а цвет Ч Не все способы цветной фотографии основаны на субтрактивном образовании цветов Существовали раньше и возрождаются теперь аддитивные методы, основанные на использовании окрашенных растрров — Прим. ред.

ржавчины — очень темный ненасыщенный оттенок красного. Некоторые присваивают цвет ржавчины предметам, которые большинство людей считают розовыми. Таким образом, могут возникать значительные расхождения при названии данного цвета красным, розовым или вишневым. Если цвет двух предметов можно сопоставить, то нет необходимости использовать название цвета. Например, в детском возрасте автор часто ходил покупать нитки для своей матери

— профессиональной портнихи. Это было нетрудно сделать, так как она всегда давала ему образцы ткани и просила подбирать нитки к ткани при дневном освещении. Если же образец не давали и просили купить розовые нитки, то он мог отобрать полдюжины оттенков красного, которые можно считать розовыми. Даже имея образец для сравнения, мальчику вместе с продавцом в некоторых случаях было трудно найти подходящий цвет. Если ткань имела оттенок, промежуточный между зеленым и желтым, то им приходилось сортировать по целому подносу катушек желтых или зеленых ниток — другими словами, возникала проблема систематизации цветов.

*Система классификации цветов по Манселлу* — хорошо известная и наиболее распространенная система систематизации цветов в США<sup>1</sup>). Эту систему можно рассматривать как способ систематизации цветов в трехмерном пространстве. Осям присвоены следующие названия: *светлота, насыщенность и цветовой тон*. Одна из моделей этого атласа цветов представляет собой вертикальную ось, к которой подвижно прикреплены прозрачные пластины полуокруглой формы<sup>2</sup>), причем на каждой пластине закреплены образцы цветов различной светлоты и насыщенности одного цветового тона. Эта система аналогична цилиндрической координатной системе, угловая координата которой соответствует цветовому тону, радиальная — насыщенности, а вертикальная — светлоте.

Цветовые тона делятся на десять основных групп, каждая из которых состоит из десяти оттенков, так что общее число цветовых тонов равно 100. Отличие двух смежных оттенков таково, что оно идентифицируется *нормальным наблюдателем*, сравнивающим образцы при стандартном освещении. Насыщенность цвета данного оттенка возрастает по мере удаления от вертикальной оси. Цвета от самого темного до самого светлого изменяются по вертикальной шкале снизу вверх. Эта шкала представляет собой шкалу серых тонов<sup>3</sup>), которая разделена на 10 тонов с равными интервалами от самого черного цвета (теоретически 0%-ная отражательная способность) до самого

" В СССР используются цветовые атласы Рабкина — ВНИИМ. — Прим. перев.

<sup>2</sup>) Чтобы легче было представить себе эту модель, вообразите апельсин, каждая долька которого подвижно закреплена на оси и представляет собой плоскую прозрачную пластину. — Прим. перев.

<sup>3</sup>) Цвета черный, оттенки серого и белый принято называть ароматическими цветами. — Прим. перев.

белого цвета (теоретически 100%-ная отражательная способность). Разделение идентифицируется нормальным наблюдателем, рассматривающим серые тона при стандартизованных условиях.

Чистый черный цвет маркирован нулем, а чистый белый — десятью. Поскольку глаз воспринимает свет по логарифмическому закону, равные ощущимые интервалы между смежными тонами этой шкалы подразумевают равные отношения коэффициентов отражения между этими тонами, и средняя точка серой шкалы приблизительно соответствует 18%-ной серой карте.

Нормальный наблюдатель сравнивает интенсивность данного цветового тона с серой шкалой. Для некоторых оттенков не существует пигментов, соответствующих всем значениям светлоты. Цвета с данными цветовым тоном и светлотой по мере увеличения насыщенности располагаются по оси, начиная от нейтрального серого (нуль) до максимально насыщенных тонов существующих пигментов (до 16 для некоторых тонов). Ощущимое различие между двумя образцами пигментов одинаковой светлоты цветового тона, но соседних по насыщенности цвета для нормального наблюдателя приблизительно одинаково для всех соседних цветов.

Система Манселла, рассматриваемая в виде некоего цветового твердого тела, не обладает внешней симметрией. Самая высокая насыщенность красного цвета соответствует 14 градациям, в то время как расположенный симметрично красному сине-зеленый цвет — только шести. Самая высокая насыщенность цвета для каждого цветового тона не всегда имеет одинаковые значения. Например, максимальная насыщенность желтого цвета соответствует двенадцатой градации при восьмой ступени светлоты, а максимальная насыщенность фиолетово-синего цвета соответствует такой же градации, но для третьей ступени светлоты. Образцы цветов также можно расположить в форме книги и задать числовую систему таким образом, чтобы неизвестные образцы пигментов можно было сопоставить с цветами Манселла и описать неизвестный пигмент с помощью цифровой номенклатуры. Эта координатная система обозначается как «цветовой тон, светлота/насыщенность цвета». Например, желтый цвет можно обозначить как 47 8/12, где 47 обозначает желтый цветовой тон, светлота которого 8, а насыщенность цвета 12<sup>1</sup> |

Эта система классификации цветов по своей природе является психологической, поскольку измеряющий инструмент — глаз человека-наблюдателя. Она пригодна для описания и

" На самом деле цветовой тон по Манселлу можно обозначать четырьмя различными способами: 1) словесно (основными названиями цветовых тонов: красный, желтый, зеленый, синий, пурпурный и их сочетаниями); 2) буквами (R, Y, G,B, R и их

сочетаниями); 3) буквами и цифрами (5R, 75R и т. д.); 4) цифрами (5, 7, 5, 10 и т. д.). Для перехода от одной номенклатуры к другой существуют специальные таблицы. Следует отметить, что светлота может меняться от 0/ для черного цвета до 10/ для белого цвета. Насыщенность изменяется от /1 до /16, принимая целые значения — *Прим. перев.*

составления каталога встречающихся цветов. Однако, если необходимо дать описание некоторого пигмента, система Ман-селла может оказаться неприемлемой. Поэтому, для того чтобы охарактеризовать пигмент, следует использовать физические методы. Для этого можно, освещая пигмент стандартным источником света, измерять его спектральную характеристику с помощью спектрофотометра, однозначно описывая оптические свойства красителя. Однако, до тех пор пока не воссоздан краситель, дублирующий эту спектральную характеристику, будет неясно, какой цвет описан. Упомянутый выше «нормальный» наблюдатель был введен до некоторой степени произвольным образом, и было бы лучше говорить о среднем наблюдателе. Не все наблюдатели обладают нормальным зрением (например, люди, страдающие дальтонизмом), хотя и среди нормальных наблюдателей существуют значительные отклонения; однако разные нормальные наблюдатели воспринимают цвета приблизительно одинаково. Глаз человека — надежный критерий относительных измерений. Он удивительно точно чувствует различие, но в то же время очень неточно выполняет абсолютные измерения. Например, человек может точно судить об относительной яркости двух источников света, видимых одновременно, но не сможет сказать, какова яркость каждого из них в отдельности.

*Система МКО* (МКО — Международная комиссия по освещению) классификации цветов — еще одна система, у которой характеристика цвета зависит от восприятия человека. Эта система соотнесена со спектральными характеристиками световых источников и спектральной чувствительностью глаза. Следовательно, ее можно рассматривать как *психофизическую*. Система МКО полезна для описания цветов спектра и всех цветов, которые могут быть получены из них. Ее применяют, чтобы охарактеризовать прозрачные окрашенные материалы, такие, как, например, фотографические светофильтры, и, кроме того, она полезна при описании окрашенных материалов в отраженном свете. При обсуждении основных цветов и механизма восприятия цвета глазом (его треххроматической природы) подразумевалось, что три аддитивных основных цвета могут быть использованы для образования многих, но не всех остальных цветов. Это ограничение связано с природой чистых спектральных цветов и способа их сложения.

Если самые интенсивные красные цвета добавляются к самым интенсивным фиолетовым, то образуются новые чистые цвета, называемые пурпурными, которые являются дополнительными цветами для зеленых. Эти цвета, образно говоря, связывают противоположные концы видимого спектра друг с другом. Пурпурные цвета нельзя идентифицировать с помощью какой-либо длины волны, поскольку они не являются спектральными цветами. Но эти цвета можно идентифицировать с помощью спектральных дополнительных цветов. Например, середина зеленой области видимого спектра соответствует длине волны 520 нм. Следовательно, дополнительный к нему пурпурный цвет можно обозначить как 520Д. Если таким образом обозначенные пурпурные и спектральные цвета называть чистыми цветами, то справедливо следующее утверждение: если смешивать два чистых цвета, то всегда можно подобрать такой чистый цвет, который, будучи смешанным с белым, дает свет, визуально неотличимый от смеси двух исходных цветов. Выразим это утверждение с помощью символов:

$$L_1(X_1) + L_2(X_2) = L_{Jw} + L_4(X_4), \quad (11.5)$$

где  $1^{\wedge}10^0 = 1,2,4$  — яркость света длиной волны  $X$ ;  $L_w(w)$  — яркость белого цвета. Вообще говоря, яркость в колориметрии — это яркость света, определенная визуально. Выражение (11.5) — равенство согласования цветов; оно имеет некоторые свойства арифметического равенства (например, аддитивность, тождественность и ассоциативность), но не является числовым. Эти арифметические свойства были установлены экспериментально с использованием глаза в качестве детектора и известны как законы Грассмана. Предположим, что  $\Delta_2$  и  $X_3$  — длины волн, соответствующие основным спектрально чистым окрашенным цветам. Тогда  $L_A(K_1) + L_B(K_2) + L_c(K_3) = L_w(w)$ ,  $(^{II} 6)$  где  $L_A$ ,  $L_B$  и  $L_c$  — яркости основных цветов, необходимые для создания белого света в выражении (11.5). Если теперь в выражение (11.5) вместо  $L_w(w)$  подставить левую часть (11.6), то после преобразования получим

$$[L_1(X_1) - L_x f X_1] + [L_2(X_2) - L_y f X_2] - L_c(X_3) = L_4(X_4). \quad (11.7)$$

Равенство (11.7) показывает, что, для того чтобы уравнять чисто окрашенный свет с яркостью  $L_4(X_4)$ , по крайней мере один основной спектральный цвет должен быть вычен из двух других. Это справедливо, когда три произвольных спектрально чистых цвета используются для уравнивания четвертого спектрально чистого цвета. Равенство (11.5) может быть обобщено так, что яркости  $L_c$  и  $L_2$  не обязательно должны соответствовать чистым цветам, а правую часть равенства все еще можно будет представить в виде суммы яркостей белого цвета и спектрально

чистого цвета.

Система МКО основывается на последовательном уравнивании каждого из трех чистых основных спектральных цветов с иными спектральными цветами. Из законов Гассмана следует, что один из основных цветов всегда должен быть отрицательным (не всегда один и тот же). Следовательно, на практике два первичных цвета могут быть уравнены с суммой третьего первичного цвета и выбранного спектрального цвета. Уравнивание осуществляется с помощью специальных спектрометров, называемых *колориметрами*, и нормальные наблюдатели оценивают совпадение цветов. В большинстве случаев вначале оце-

нивается относительная яркость основных цветов для того, чтобы уравнять их смесь с отобранным белым по мнению наблюдателей, и затем для каждого основного цвета при последующем цветовом уравнивании вычисляется его яркость, необходимая для уравнивания выбранного белого цвета. Шкалы основных цветов, полученных при измерении физическим прибором (например, фотометром), обычно не идентичны. Относительные яркости каждого основного цвета, необходимые для уравнивания спектрального цвета, определяются и регистрируются. На рис. 11.11 представлены результаты подобного эксперимента, осуществленного У. Райтом<sup>1</sup>), который на начальном этапе эксперимента не проводил балансировки трех основных цветов при уравнивании белого цвета, но делал нечто подобное. Спектральными основными цветами являются красный ( $X=650$  нм), зеленый ( $X=530$  нм) и синий ( $1=460$  нм). Гилд<sup>2</sup>) провел подобные измерения практически одновременно с Райтом (1930). Система МКО основана на усреднении результатов, полученных этими двумя исследователями. В системе МКО результаты таких экспериментов представляют не в абсолютных величинах яркостей основных спектральных цветов, а в величинах, отнесенных к сумме яркостей трех основных цветов. Такие основные цвета не существуют в действительности и обозначаются как  $x$ ,  $y$  и  $z$ <sup>3</sup>). Они вводятся для того, чтобы исключ-

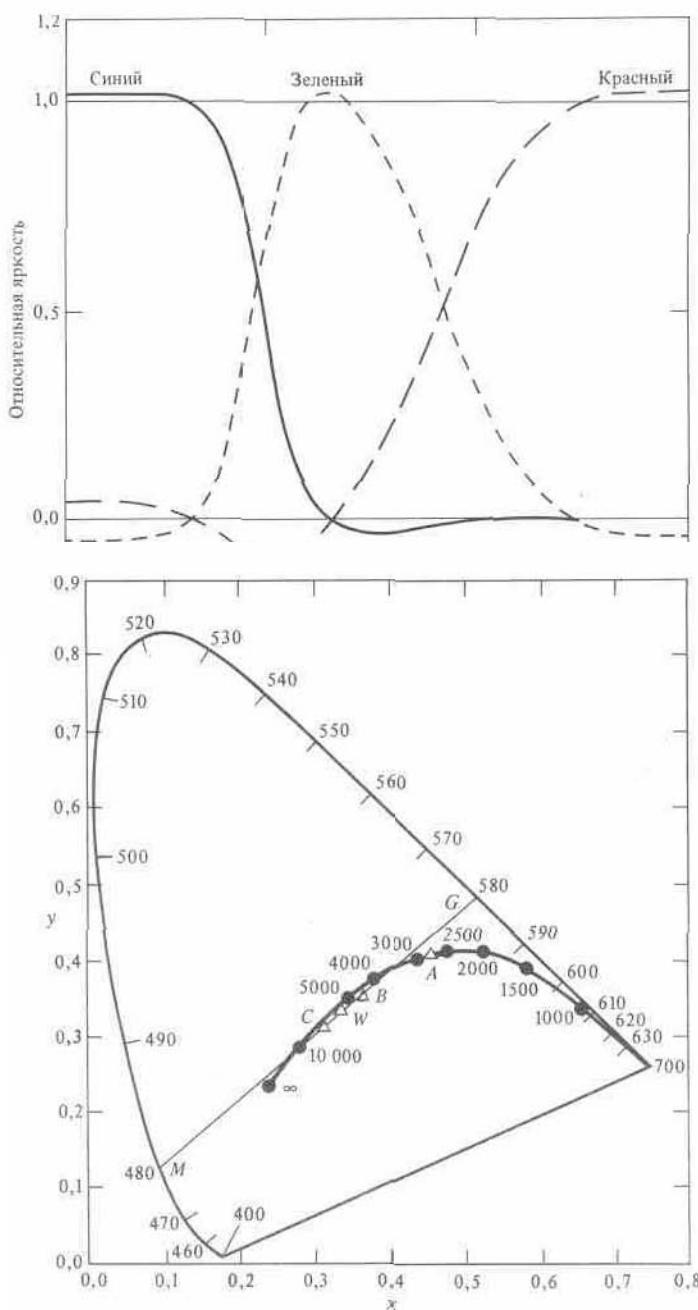


Рис. 11.11.

Спектральные кривые трех основных цветов, необходимые для получения цветов спектра.

<sup>1</sup>> Wright W. D. Researchers on Normal and Defective Color Vision, London: H. Kampton, 1946.

<sup>2</sup>> Guild J. Phil. Trans. Roy. Soc. A, 230, 149 (1931). <sup>3</sup>> Эти величины называются координатами цветности. — Прим\* перев.

чить отрицательные значения, которые являются неизбежными в других системах, основанных на реальных основных спектральных цветах. Кроме того, поскольку основной интерес представляют яркости каждого основного цвета, необходимого для уравнивания спектральной линии, сумма яркостей трех основных цветов нормируется так, что

$$x+y+z = l. \quad (11.8)$$

Рис. 10.12.  
Цветовая диаграмма  
МКО

Если  $x$  и  $y$  известны, то величина  $z$  может быть определена исходя из этого уравнения. Цветовая диаграмма МКО представлена на рис. 11.12. Линия подковообразной формы — геометрическое место точек цветов спектра. Например, величины  $x$  и  $y$  для спектрального цвета с длиной волны 480 нм (синий оттенок) составляют приблизительно 0,09 и

0,13 соответственно. Следовательно,  $z=1-0,09-0,13=0,78$ . Белая точка, расположенная при  $x=y=z=0,33$ , — равноэнергетическая точка графика цветности. Отметим, что задание равных значений  $x$ ,  $y$  и  $z$  для белой точки приводит к тому, что цветовые координаты соответствуют необходимым яркостям каждого основного цвета для формирования этого особого белого цвета. Источники излучения, представляющие собой абсолютно черные тела и обозначенные буквами  $A$ ,  $B$  и  $C$ , являются стандартными осветительными устройствами, используемыми в МКО-колориметрии.

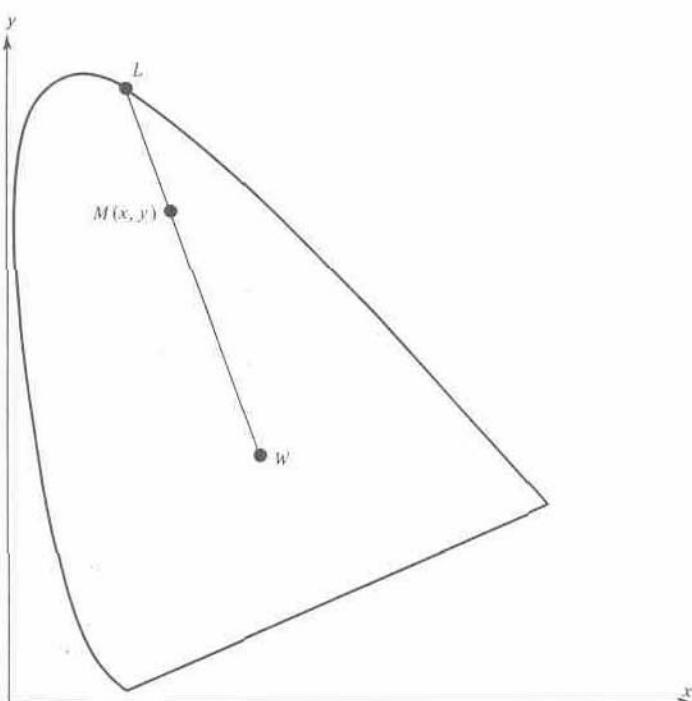
Напомним, что эта диаграмма основана на наблюдениях, сделанных группой наблюдателей, сравнивающих реальные цвета. Усредненная чувствительность наблюдателей называется *чувствительностью МКО стандартного наблюдателя*. Результаты применимы к цветному видению, ограниченному центральным полем зрения (дневное видение), которое является преобладающим благодаря чувствительности колбочек глаза. Интересно, что некоторые люди могут видеть свет с длиной волны, меньшей 400 нм или большей 700 нм. Цветовая диаграмма представляет все возможные цвета, которые могут быть получены из спектрально чистых цветов. Используя чистые цвета, можно сформировать любой другой цвет, координаты которого лежат внутри плоскости, ограниченной линией спектральных цветностей и прямой линией, соединяющей точки, соответствующие 400 и 700 нм. Эта прямая линия, как говорилось, представляет собой геометрическое место точек чистого пурпурного цвета, получаемого при смешении цвета с длиной волны 400 нм (фиолетового) и 700 нм (красного).

Вообще, если смешать два спектральных цвета, координаты цвета смеси будут лежать на прямой линии, соединяющей точки положений спектральных цветов на цветовой диаграмме МКО. Например, если белый цвет, координаты которого есть  $(0,33; 0,33)$  на диаграмме МКО смешать со спектральным желтым цветом с длиной волны 520 нм  $(0,06; 0,84)$ , то координаты полученного при смешении цвета будут располагаться на линии, соединяющей эти точки. В действительности это справедливо для смешения любых двух цветов, которые могут быть нанесены на цветовую диаграмму МКО. Очевидно, что самыми чистыми цветами являются спектральные цвета. Цвета, которые образуются при смешении чистого спектрального цвета с белым и координаты которых лежат вблизи линии спектральных цветностей, являются более чистыми по сравнению с цветами, которые находятся вблизи белой точки. Спектральный цвет определяется *доминирующей длиной волны*, и любой цвет может быть описан, исходя из его чистоты и доминирующей длины волны. Цвет  $M$  (рис. 11.13) на цветовой диаграмме, полученный при сложении чистого спектрального цвета  $L$  с белым цветом  $W$ , может быть описан либо с помощью воображаемых основных цветов (координат цветности  $x$ ,  $y$ ), либо с помощью доминирующей длины волны ( $L$ ) и соответствующей *условной чистоты*  $p$ , где  $p$  определяется из соотношения длин отрезков  $WM$  и  $WL$ . Чистота белого цвета равна 0, и чистота спектрального цвета равна 1. Поскольку термины доминирующей длины волны и чистоты цвета более понятны, чем термин координата цветности, раньше их использовали чаще.

Хотя чистота цвета и доминирующая длина волны представляют собой психофизические характеристики цвета, их соответствующими психологическими аналогами являются насыщенность и цветовой тон. Можно ожидать, что цвета

Рис.11.13.

Нахождение доминирующей длины волны и условной чистоты цвета  $M$



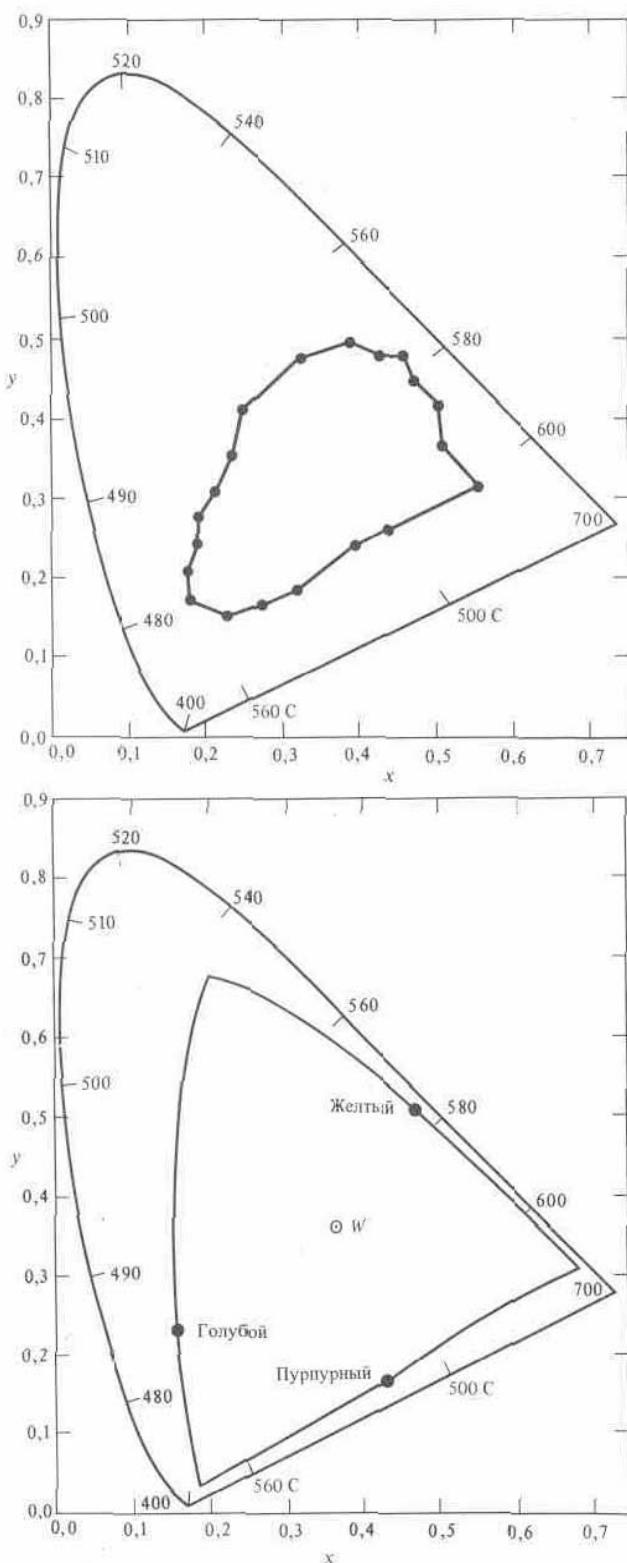
одного и того же оттенка будут лежать вдоль линии, связывающей белую точку и доминирующую длину волны (линия  $WL$ , например). Вообще говоря, такие линии являются не прямыми, а слегка искривленными.

Третья психологическая характеристика цвета — светлота — не имеет аналога на цветовой диаграмме МКО. Аналогом должна быть яркость или ее эквивалент, а диаграмма МКО не дает никакой информации об этой величине. Если спектральное распределение источника света (например, вольфрамовой лампы) известно, то

можно определить положение его цветов на диаграмме МКО. Напомним, что при обсуждении излучения абсолютно черного тела эти источники были охарактеризованы с помощью цветовых температур. Поскольку спектральное распределение излучения абсолютно черного тела известно (рис. 10.1), могут быть вычислены цветовые координаты этих источников (рис. 11.12). Числа, указанные на кривой, — температуры (в Кельвинах) источников света, представляющих собой абсолютно черные тела, соответствующие найденным цветовым координатам. Буквы *A*, *B* к *C* показывают положение трех стандартных источников света, используемых в колориметрии. Источник света типа *A*, цветовая температура которого 2856 K, соответствует вольфрамовой лампе большой мощности. Источник света типа *C*, цветовая температура которого 6774 K, приблизительно соответствует дневному освещению. На рис. 11.12 белая точка обозначена как *W*. Рассмотренные источники света особенно важны при фотографировании на цветную фотопленку при различных условиях освещения и при использовании светофильтров.

Вспомним, что дополнительные цвета представляют собой такие пары, которые, будучи смешанными, создают белый цвет. Поскольку цвет, получающийся в результате аддитивного сложения двух цветов, лежит на линии, соединяющей положения этих цветов на цветовой диаграмме МКО, дополнительные

цвета должны располагаться на цветовой диаграмме МКО так, чтобы соединяющая их линия проходила через белую точку. Если белую точку обозначить посредством *W* (рис. 11.12), то дополнительный спектральный цвет для каждого спектрального цвета может быть определен с помощью хорды, проходящей через *W* и связывающей два спектральных цвета. Например, дополнительным к спектрально окрашенному свету с длиной волны 580 nm является спектрально окрашенный свет с длиной волны 480 nm, и при смешивании в соответствующем соотношении получается белый цвет, соответствующий белой точке *W* (рис. 11.12). Два менее чистых цвета, лежащие на хорде *GM* с разных сторон от белой точки, могут также быть смешаны до белого цвета, и они также будут дополнительными. Дополнительным к спектрально чистому свету с длиной волны 700 nm будет сине-зеленый цвет с длиной волны приблизительно 494 nm, а для 400 nm — желто-зеленый с длиной волны 570 nm. Белая точка является произвольной, и тот цвет, который выбирают как белый, зависит от окружения и состояния зрения наблюдателя. Даже так называемый нормальный или средний глаз воспринимает различные цвета как белый в зависимости от окружающих условий. Поэтому и дополнительные цвета зависят до некоторой степени от того, какой цвет выбран за белый. Например, если белый цвет получают от осветительного устройства *C* (рис. 11.12) и нормальный наблюдатель определяет дополнительный цвет к желтому спектрально чистому свету (свет с длиной волны X=580 nm), то он выберет синий цвет (X=480 nm) для сложения с желто-красным цветом, чтобы получить белый цвет, уравнивающий цвет света от осветительного устройства *C*. Этот дополнительный цвет не отличается от полученного в случае, когда в качестве эталона белого цвета выбрана белая



точка *W*. Если, однако, в качестве эталона белого цвета выбрана вольфрамовая лампа *A* (рис. 11.12), то дополнительным к тому же самому желто-красному цвету будет цвет спектральной линии с длиной волны приблизительно 465 нм. Приведенные факты намечают только общие черты тех проблем, с которыми сталкиваются в цветной фотографии при использовании общепринятых источников света, обладающих различными спектральными характеристиками. Хотя цветовая диаграмма МКО разработана и наиболее пригодна для изучения поведения окрашенных световых лучей, ее можно применять (в разумной степени) и к другим цветовым системам. Цвета Ман-селла с самой высокой насыщенностью показаны на рис. 11.14 и определяют приблизительную границу для типографских красок.

2<sup>^^</sup>

Рис. 11.14

Положения 20 образцов цвета системы Манселла на цветовой диаграмме

МКО.

Рис. 11.15.

Положения на диаграмме МКО цветов, получаемых с помощью желтого, пурпурного и голубого красителей, используемых в цветной фотографии.

Наконец, область цветов, которые могут образоваться при смешении красителей желтого, пурпурного и голубого цветов, используемых в цветных фотопленках, показана на рис. 11.15. Фигура приблизительно треугольной формы внутри линии спектральной цветности содержит цвета, которые можно получить из этих субтрактивных основных цветов. Более подробно вопросы *трехцветного видения* и цветовая система МКО освещены в книге Легранда (см. выше).

#### Упражнения

1. Опишите четыре различных способа создания цвета предмета.
2. Объясните, почему небо голубое, а закат красный.
3. Каким образом кусок ткани может отражать больше видимого света, чем полное количество падающего на него видимого света?
4. Какой цвет будет иметь фотоснимок красного цвета, если его освещать каждым из следующих окрашенных светов: красным, зеленым, белым, пурпурным, голубым?
5. Почему мы можем использовать три основных цвета для получения всех остальных цветов?
6. Какие основные цвета используются в цветной фотографии? Какие существуют субтрактивные основные цвета и как они связаны с основными?
7. Если белый цвет пропускать сквозь желтый и зеленый светофильтры, то какой цвет будет на выходе? Каким будет цвет при использовании желтого и красного светофильтров?
8. Почему основные цвета не являются единственными?
9. Почему основные цвета непригодны в качестве цветных пигментов, но очень хороши в роли люминофоров для цветного телевизионного экрана?
10. Назовите два цвета различного цветового тона и два одинаковых цветовых тона различной светлоты или насыщенности.
11. Сравните системы классификации цвета Манселла и МКО. В чем их сходство и отличие?
12. Почему нельзя сложить три световых луча, окрашенных в основные цвета, чтобы получить любой другой спектрально чистый окрашенный световой луч?

## Глава 12. Цветная фотография

### Пути развития цветной фотографии

Не будем останавливаться на подробном описании истории развития цветной фотографии, а только рассмотрим основные научные открытия, которые легли в основу современной цветной фотографии. Более подробно эти вопросы освещены в работах Ньюхолла<sup>1)</sup>, а также Эванса и др.<sup>2)</sup>.

Еще в те времена, когда стала развиваться дагерротипия, фотографы стремились к получению цветного изображения. В 1861 г. Максвелл разработал метод, с помощью которого могли быть получены цветные изображения. В том же году в лондонском Королевском институте он продемонстрировал цветное изображение красной ленты. Саттон изготовил три черно-белые фотографии на пленке, снятые последовательно через красный, зеленый и синий фильтры. На каждом из негативов были зарегистрированы соответственно красная, зеленая и синяя составляющие цвета ленты<sup>3)</sup>. С помощью негативов были изготовлены диапозитивы, изображение каждого из которых проецировалось через фильтр того же самого цвета — красного, зеленого или синего. После совмещения картинок на экране появлялось цветное изображение предмета. Рассмотренный метод представляет собой пример использования *аддитивного синтеза цвета* для получения цветного изображения. Несмотря на то что процесс довольно громоздкий, изображения бледные и можно фотографировать только натюрморты, все же это был способ получения цветной фотографии. Вызывает удивление сам факт осуществления этого процесса, учитывая то, что фотопленки, использованные Саттоном, не были сенсибилизированы

ни к красной, ни к зеленой частям спектра. Как известно, светофильтры приводят к ослаблению света, и, возможно, что только излучение ультрафиолетовой и синей областей спектра экспонировало пластины. С появлением панхроматических пленок метод Максвелла был усовершенствован, что было шагом вперед на пути развития современной цветной фотографии.

Ч Newhall B. The History of Photography, N. Y.: The Museum of Modern Art, 1981, p. 191ff

<sup>2)</sup> Evans R. M., Hanson N. T., Jr., Brever W. L. Principles of Color Photography, New York: John Wiley, 1953, p. 271ff.

<sup>3)\*</sup> Так называемые цветоделенные негативы. — Прим. перев.

Были разработаны и другие процессы, использующие принцип аддитивного синтеза цвета. В основе этих процессов лежит способ изготовления диапозитивов на фотоматериале с одним слоем эмульсии, на которой было размещено много очень мелких светофильтров красного, зеленого и синего цветов, настолько мелких, что глаз не мог различить их с расстояния нормального зрения. Возможно, первым наиболее удачным методом был *автохромный процесс*, развитый братьями Люмьер. Для его осуществления мелкие зерна крахмала окрашивались в красный, зеленый и синий цвета. Эти зерна равномерно распределялись по стеклянной пластинке в соотношении 4:3:2<sup>1)</sup> и покрывались эмульсией. Изготовленная таким образом фотопластинка экспонировалась со стороны стекла и проявлялась с обращением для получения диапозитива. Этот метод был разработан в 1903 г., стал коммерчески доступен в 1907 г. и применялся до 1932 г. В других аналогичных методах использовалось упорядоченное расположение элементов раstra наподобие устройства цветного кинескопа, описанное в гл. 6. Прежде чем приступить к изложению теории цветной фотографии, основанной на субтрактивном принципе получения цветов, отметим, что метод Максвелла регистрации цветного изображения с помощью светофильтров и черно-белой фотопленки до сих пор является наилучшим с точки зрения долговременного хранения цветных изображений.

### Субтрактивная цветная фотография

Один из первых удачных методов *субтрактивной цветной фотографии* — *цветной углеродный процесс* — был разработан в 1869 г. независимо Хауроном и Кроссом на основе углеродного процесса, уже использовавшегося в черно-белой печати. Аналогично методу Максвелла изготавляются три цветоде-ленных негатива. Каждый негатив используется для экспонирования слоя желатины, обработанного бихроматом и окрашенного в цвет, дополнительный по отношению к основному цвету негатива. Желатина, обработанная бихроматом, задубливается в зависимости от количества света, попавшего на него. Например, для получения желтого цветовыделейного изображения используется «синий» негатив. Части «синего» негатива, соответствующие синему участку сцены, обладают значительной оптической плотностью, и поэтому до фотоэмульсии доходит малое количество света. Фотослой будет наиболее освещен на тех участках, которые соответствуют прозрачной части «синего» негатива. Неэкспонированная желатина не задубливается и может быть растворена теплой водой. В результате образуется желтое желатиновое рельефное изображение, тонкое в синих участках сцены и плотное в областях, где не было синего цвета. «Красный» и «зеленый» негативы используют для экспо-

" Окрашенные зерна крахмала на поверхности пластиинки образуют так называемый мозаичный растр. — Прим. перев.

Рис. 12.1.

Схема получения изображения листа синей бумаги на черном фоне с помощью цветного углеродного метода



ирования желатиновых слоев, окрашенных в соответствующие дополнительные цвета. Полученные таким образом три рельефных изображения в желатине затем совмещают и получают удовлетворительный цветной диапозитив.

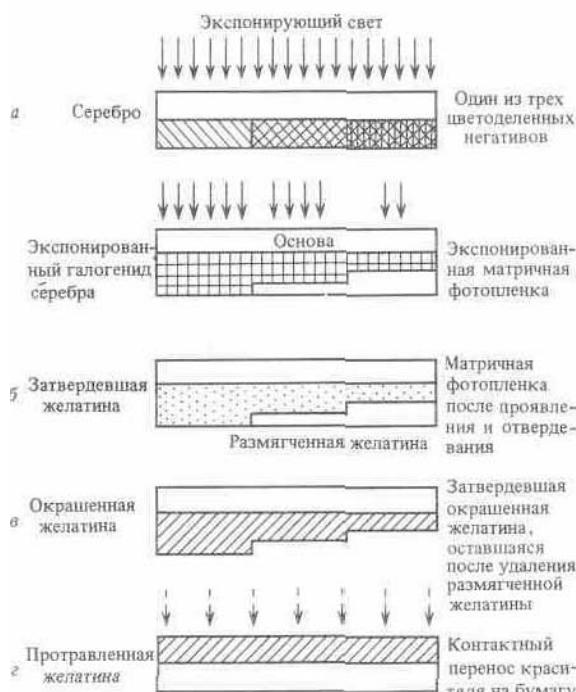
Чтобы лучше понять изложенное, рассмотрим следующий пример. Представим себе, что лист синей бумаги фотографируется на черном фоне с помощью цветного углеродного процесса. Слой желтоокрашенной желатины будет тонким на участках, которые соответствуют положению этого листа (рис. 12.1), и плотным на остальных участках. Слои желатины пурпурного (дополнительный к зеленому) и голубого (дополнительный к красному) цветов будут равномерно плотными, поскольку красный и зеленый негативы будут везде прозрачными. С помощью доказательства, аналогичного использованному в примере 11.1, можно установить, что через ту часть «санвича», которая соответствует черному фону объекта, не будет проходить свет и только синий свет будет проходить сквозь остальную часть «санвича», соответствующую синей части объекта. После появления панхроматических фотопластинок удовлетворительного качества цветной углеродный процесс стал коммерчески доступным (около 1877 г.).

Приблизительно в 1900 г. Манли разработал процесс, который впоследствии стал известен как *трехцветный карборо-процесс* и который по сути дела является усовершенствованным на основе открытий Фармера углеродным процессом. Фармер обнаружил, что при контакте тонко измельченного серебра, желатины и растворимого бихромата образуется задубленная желатина, нерастворимая в воде. В карбропроцессе цветоделен-ные негативы используются для получения обычных черно-белых фотоотпечатков. Если желатиновые пигментные фотобумаги, окрашенные в цвета, дополнительные к трем основным (аналогичные тем, что используются в цветном углеродном процессе), обрабатывают раствором бихромата и приводят в контакт с отпечатком, полученным с негативов соответствующего им основного цвета, то желатина задубливается в большей степени в местах, находящихся в контакте с серебром отпечатка (черные участки). После растворения незадубленной желатины три желатиновые пигментные фотобумаги при точном их совпадении образуют цветной диапозитив. Если диапозитив совмещается с белой бумагой, то получается цветной отпечаток. Многие фотографы считают, что карбротипы, получаемые этим методом, обладают высшим качеством.

*Способ печати с переносом цвета* (например, Kodak)

Рис. 12.2.

Схема получения изображения способом переноса цвета.



12.2,в). Количество красителя на любом участке матрицы пропорционально толщине задубленной желатины. Полученная таким способом окрашенная желатина, называемая *цветоделенной матрицей*, затем приводится в контакт с бумагой, покрытой *набухшей желатиной* (бумага для переноса цветного изображения), которая поглощает и закрепляет краситель (рис. 12.2,г). После того как все три окрашенные матрицы последовательно приведены в контакт с бумагой, получается цветной отпечаток очень высокого качества.

<sup>1></sup> В настоящее время он называется гидротипным способом получения цветного изображения. — Прим. перев.  
Отметим, что этот процесс начинается с получения цветоделенных негативов. Если снимаемый объект статичен, то негативы могут быть изготовлены таким же способом, как и в методе Максвелла и Саттона. Можно фотографировать на три черно-белые пленки, используя специальную цветоделяющую фотокамеру<sup>1)</sup> и соответствующие светофильтры. В настоящее время цветоделенные негативы часто получают на основе оригинального цветного негатива или диапозитива, используя соответствующие светофильтры и фотопленки.

Современная цветная негативная фотопленка после экспонирования в обычной фотокамере и обработки может быть использована для получения цветного отпечатка или диапозитива. Манне и Годовски, сотрудники компании «Истмен Кодак», успешно использовали процесс, запатентованный Фишером и названный *цветным проявлением*<sup>2)</sup>. Впервые в 1935 г. были внедрены фотопленки, синтез цвета в которых осуществлялся по субтрактивному принципу. В этих фотопленках три цветочувствительные эмульсии, нанесенные на общую подложку,

Matrix Film 4150) — современный метод получения цветных отпечатков и диапозитивов на основе цветоделенных негативов<sup>1</sup>). Матричная пленка освещается со стороны основы (рис. 12.2,а) через один из цветоделенных негативов. Добавленный в эмульсию матричной пленки желтый краситель ограничивает глубину экспонирования пленки, чувствительной к синему цвету, слоями, лежащими вблизи основы. Наименее оптически плотные участки цветоделенного негатива приводят к самым большим экспозициям матричной пленки. Дубящий проявитель вызывает задубливание желатины на участках пленки, подвергнувшихся проявлению. Толщина задубленной желатины (рис. 12.2,б) пропорциональна экспозиции. После закрепления в недубящем фиксаже незадубленную желатину растворяют (рис. 12.2,в), а оставшаяся желатина окрашивается в цвет, дополнительный к основному цвету, который соответствует цвету негатива (рис. 12.2,в).

экспонируются одновременно в обычной фотокамере. После соответствующей обработки экспонированной пленки можно получить диапозитив. Такие фотопленки и некоторые другие их типы<sup>3)</sup>, действующие по методу цветного проявления, используются в современной цветной фотографии. Оставшаяся часть этой главы посвящена рассмотрению принципа действия этих фотопленок и вопросам их использования.

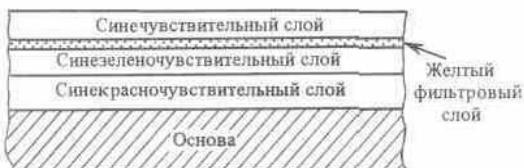
**Современные и фотобумаги** Как правило, фотоматериалы, используемые сегодня в цветной фотографии, состоят из трех или более эмульсионных слоев. В материалах подобного типа три цветочувствительных слоя полты друг на друга и на общую основу (рис. 12.3). Каждый из слоев в отдельности предназначен для регистрации одного из основных цветов. В качестве основы используется бумага с полиэтиленовым покрытием или прозрачный полимер с противоореольным слоем на обратной стороне, аналогичный полимерам, применяемым в черно-белой фотографии. Верхний слой предназначен для регистрации лучей синей трети спектра, средний — зеленой, нижний — красной.

<sup>1)</sup> Цветоделящая фотокамера представляет собой устройство, в котором используется расщепление светового пучка, прошедшего через объектив, на три оптических изображения. Расщепление производится при помощи полуопрозрачных зеркал или стеклянных призм. Цветные светофильтры в этих камерах помещаются непосредственно перед эмульсионными слоями пленок. — *Прим. перев.*

<sup>2)</sup> В процессе цветного проявления специальные цветные компоненты (органические соединения) образуют красители цветного изображения. Образование этих красителей происходит в результате реакции сочетания цветных компонентов с первичными продуктами окисления цветных проявляющих веществ. — *Прим. Перев.*

<sup>3)</sup> Здесь автор имеет в виду одноступенчатые фотоматериалы типа «Поляроид». — *Прим. Перев.*

Рис. 12.3.  
Схема строения типичной цветной фотопленки.



Поскольку все галогениды серебра чувствительны к синему свету, желтый фильтровый слой включают в трехслойную цветную фотопленку между верхним и средним слоями; этот слой поглощает синие лучи, прошедшие сквозь верхний эмульсионный слой, для предохранения от их воздействия нижних слоев. Этот фильтровый слой состоит из *коллоидного серебра*, которое удаляется с оставшимся серебром в процессе обработки пленки на стадии отбеливания. Желтый фильтровый слой отсутствует в цветной фотобумаге, так как в двух нижних слоях фотоэмulsionии в этом случае используется хлорид серебра, обладающий низкой чувствительностью к синему цвету. Средний и нижний слои эмульсии оптически сенсибилизированы соответственно к зеленым и красным лучам за счет добавок соответствующих сенсибилизаторов, практически таких же, как и красители, используемые в панхроматической черно-белой фотопленке.

*Кривые спектральной чувствительности* типичной цветной фотопленки представлены на рис. 12.4. Чувствительность обратно пропорциональна интенсивности света с данной длиной волны, необходимой для создания определенной плотности красителя в проявленном слое. Кривая, обозначенная буквой *C* (от слова синий), относится к спектральной чувствительности верхнего слоя, *3* — среднего, *K* — нижнего. Сравнение этой регистрирующей системы с цветовой чувствительностью колбочек нормального глаза (рис. 6.5) показывает, что кривые чувствительности каждого слоя пленки перекрывают спектральный диапазон шире, чем в случае глаза, особенно кривые слоев, чувствительных к зеленым и красным лучам. Так как качество цветной фотографии оценивается визуально, спектральные чувствительности пленки и глаза должны по возможности совпадать.

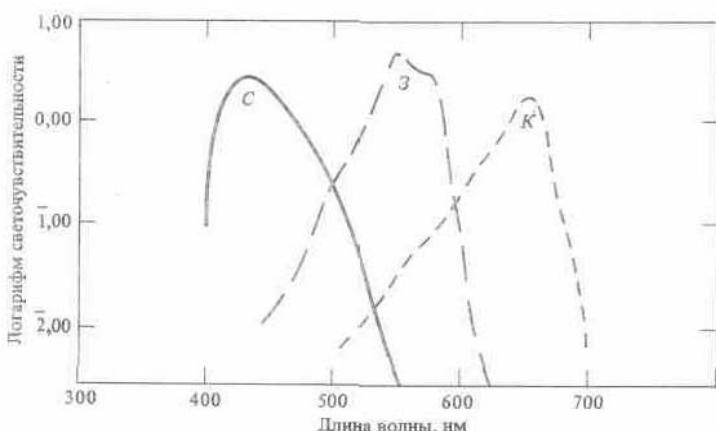


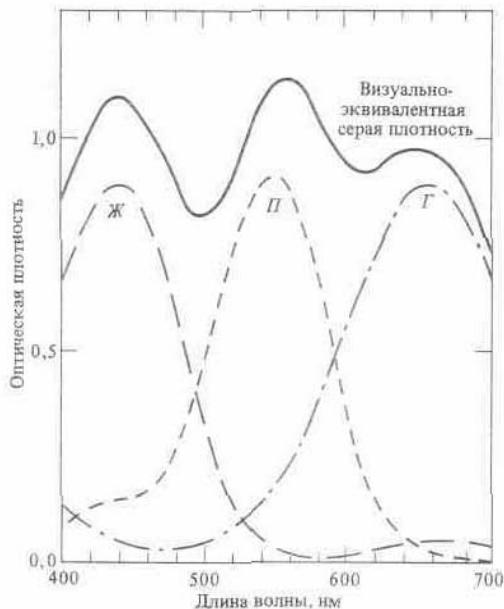
Рис. 12.4.  
Кривые спектральной чувствительности профессиональной фотопленки Kodak Ektachrome 64.  
Несовпадение этих кривых чувствительности пленки и глаза вызывает, в частности, определенные трудности, если съемка производится при некоторых специальных источниках освещения, например лампах дневного света. Хотя каждый из рассмотренных

цветочувствительных слоев рассматривался как однородный, они могут состоять из нескольких отдельных слоев, что позволяет получить фотопленки с желаемыми характеристиками по общей и спектральной чувствительности.

Используемые для регистрации цветного изображения галогениды серебра сами по себе не могут образовывать цвета Независимо от того, используется ли фотопленка в черно-белой или цветной фотографии, гранулярное серебро всегда черное. Цвет вводится в пленку или отпечаток посредством краскообразующих компонентов, которые активируются во время *цветного проявления*. Краскообразующие компоненты уже упоминались при описании диазопроцесса (гл. 6). Они представляют собой бесцветные соединения, которые вводятся в светочувствительную эмульсию в процессе изготовления фотопленки или при ее проявлении. Эти соединения приобретают окраску, если они подвергаются химическому процессу, называемому цветным проявлением. В тех местах пленки, где произошло проявление, галогенид серебра восстанавливается до серебра, а проявляющий компонент окисляется (гл. 7). В процессе цветного проявления продукты окисления проявляющего вещества реагируют с краскообразующими компонентами с образованием окрашенных участков только в тех местах, где произошло проявление. При черно-белом проявлении к проявителю добавляют сульфит натрия, чтобы предотвратить эту реакцию. Цвет красителя каждого слоя является дополнительным к соответствующему основному цвету, к которому чувствителен этот слой. Следовательно, верхний слой окрашен в «белый—синий=желтый», средний — в «белый—зеленый=пурпурный» и нижний — в «белый—красный=голубой» в тех местах, где произошло цветное проявление. На рис. 12.5 представлены спектральные кривые оптических плотностей красителей каждого слоя для типичной *цветной обращаемой фотопленки*. Перекрывающиеся кривые — это характеристики желтого (*Ж*), пурпурного (*П*) и голубого (*Г*) слоев пленки, а верхняя кривая представляет суммарную плотность красителей трех слоев. Красители подобраны так, что их общая плотность воспринимается нормальным глазом как нейтрально-серая (визуально-эквивалентная серая плотность) и равна единице (глаз является основным оценщиком цвета). Оптическая плотность, отложенная на этом графике, называется *диффузной оптической плотностью*. В гл. 8 был описан метод измерения оптической плотности в проходящем свете. На рис. 8.2 показаны только параллельные пучки, проходящие сквозь фотопленку, на самом же деле часть света будет рассеиваться ею. Если измеряются, как показано на рис. 8.2, только параллельные лучи, прошедшие сквозь пленку, то определяемая оптическая плотность называется *оптической плотностью в проходящем свете*.

Рис. 12.5,

Спектральные кривые оптических плотностей красителей, используемых в профессиональной фотопленке Kodak Ektachrome 64.



Если измеряется весь прошедший свет (включая рассеянный), то оптическая плотность называется диффузной оптической плотностью.

Отметим, что визуально-эквивалентная серая плотность меняется в зависимости от длины волны (рис. 12.5). Эти изменения регистрируются измерительными приборами, глаз же их не замечает; другими словами, оптическая плотность для глаза будет равномерно серой. Отметим также, что кривые желтого, пурпурного и голубого цветов перекрываются. Это положение (главным образом), а также неравномерность спектральной чувствительности (в меньшей степени) являются причинами того, что некоторые участки изображения кажутся имеющими загрязненный цвет.

Краскообразующие вещества могут вводиться в фотоэмульсию в процессе ее изготовления или во время проявления. В случае цветной обращаемой

пленки Kodac-hrome (одна из первых многослойных фотопленок) краскообразующие вещества вводятся в эмульсию во время проявления. Поскольку они должны быть введены в каждый слой эмульсии для создания конечного окрашенного изображения, необходимы три разных цветных проявляющих раствора.

Вначале Краскообразующие компоненты не могли быть внедрены в эмульсию в процессе производства пленки, так как имели тенденцию к диффузии из одного слоя эмульсии в другой до проявления. После создания пленки Kodachrome была разработана пленка Agfa с недиффундирующими краскообразующими компонентами. Недиффундирующие краскообразующие вещества добавлялись в эмульсию во время изготовления фотопленки и стабилизировались благодаря их «прикреплению» к молекулам с длинными звеньями<sup>1</sup>. В 1942 г. компания «Истмен Кодак» внедрила пленку Kodak Kodacolor и фотобумагу Kodacolor — первые многослойные цветные негативно-позитивные фотоматериалы для цветной фотопечати. Вводимые в эти материалы во время производства краскообразующие компоненты стабилизировались сначала растворением их в маслянистом растворе, который затем диспергировался в эмульсии. В обращаемой пленке Ektachrome краскообразующие вещества диспергировались в эмульсии почти так же, как и в материалах Kodacolor<sup>2</sup>).

### **Обращаемые фотопленки**

Процесс обращения применительно к черно-белой фотографии был изложен в гл. 7. Процесс цветного обращения для пленок типа Ektachrome аналогичен черно-белому обращению. В табл. 12.1 приведены для сравнения рабочие стадии этих двух процессов. Отметим, что в процессе цветного обращения вторым проявлением является цветное проявление, после которого осуществляется стадия отбеливания. Засветка оставшегося галогенида серебра осуществляется путем освещения пленки равномерным светом, как в черно-белом процессе, или химическим методом. В последнем случае используется содержащий химически вуалирующее вещество специальный одностадийный

**Таблица 12.1. Сравнение процессов обработки обращаемых черно-белых и цветных фотопленок**

Фотопленка

| Черно-белая                         | Цветная                     |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Экспонирование в фотокамере         | Экспонирование в фотокамере |
| Проявление                          | Отбеливание                 |
|                                     | Проявление                  |
| Второе экспонирование<br>(засветка) | Второе экспонирование       |
| Проявление                          | Цветное проявление          |
| Фиксирование                        | Отбеливание                 |
| Промывка                            | Фиксирование                |
|                                     | Промывка                    |

<sup>1</sup> Обычно эти молекулы-носители содержат длинноцепочечные радикалы с 12—18 атомами углерода. — Прим. перев.

<sup>2</sup>) В нашей стране работы по разработке многослойных фотоматериалов были начаты со времени опубликования основных патентов на способы цветного проявления и многослойные фотоматериалы, однако промышленное развитие цветофотографический процесс на этих материалах получил начиная с 1945 г. В настоящее время в СССР выпускаются фотоматериалы только с недиффундирующими краскообразующими компонентами. — Прим. перев.

проявитель, который одновременно осуществляет цветное проявление и «засветку» оставшегося галогенида серебра. При обработке пленок, в которых краскообразующие вещества вводятся во время проявления (например, Kodachrome), каждая из трех эмульсий подвергается отдельному проявлению после первого черно-белого проявления. Сначала один из слоев эмульсии экспонируется через соответствующий фильтр, а затем осуществляют цветное проявление этого слоя с помощью проявителя, содержащего соответствующее краскообразующее вещество. Например, слой, чувствительный к красному цвету, может быть экспонирован красным светом с последующим цветным проявлением в проявителе, содержащем вещество, создающее голубой краситель<sup>1</sup>. Процесс повторяют для второго слоя, а затем и третий слой подвергается аналогичному проявлению после освещения его белым светом. Потом осуществляются отбеливание, фиксирование и промывка. Однако процесс слишком сложен для осуществления его в домашних условиях.

В процессе цветного обращения (табл. 12.1) создается позитив, цвета которого соответствуют цветам фотографируемого объекта, как показано на рис. 12.6. После первого проявления (*a*) создается обычное серебряное изображение, напоминающее черно-белый негатив. После второго,

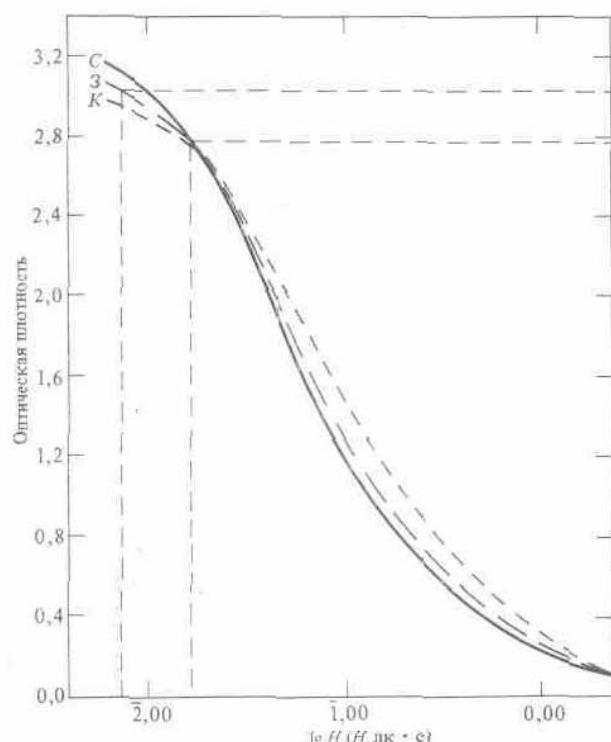
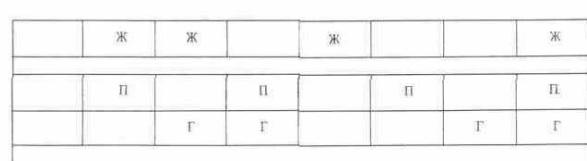
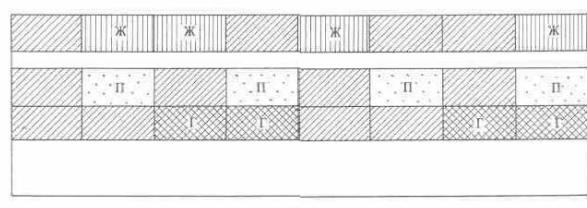
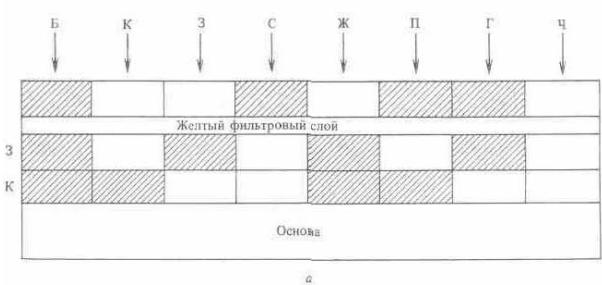
цветного, проявления (б) в пленке все серебро восстановлено и цветоделенные красители образуются в тех местах, где имело место цветное проявление. После отбеливания пленки (в) получается цветной позитив. Если позитив рассматривать в белом проходящем свете, то изображение будет иметь цвета, соответствующие оригиналу. Используя аргументы, аналогичные рассмотренным в гл. 11 (рис. 11.8—11.10), читатель легко может убедиться в справедливости результата.

Характеристическая кривая обращаемой фотопленки представляет оптическую плотность позитива как функцию логарифма экспозиции. Так как малые экспозиции соответствуют теням объекта и соответственно высоким оптическим плотностям позитива, характеристические кривые выглядят зеркально перевернутыми (рис. 12.7) по сравнению с характеристическими кривыми для негативных материалов. Кроме того, поскольку фотопленка состоит из трех слоев эмульсии, необходимо представлять характеристическую кривую для каждого слоя. Вспомним, что при описании черно-белых обращающихся фотоматериалов говорилось о том, что в высококачественном позитиве должен наличествовать большой диапазон оптических плотностей. Именно этим позитив отличается от черно-белого негативного изображения, в котором используются главным образом нижняя и средняя части характеристической кривой. Требования к диапозитиву весьма схожи с требованиями к

>> Освещение нижнего слоя, чувствительного к красному свету, осуществляют со стороны подложки. — Прим. перев.

Рис. 12.6.

Схема получения цветного изображения на обращаемой фотопленке а — черно-белое проявление, б — засветка (второе экспонирование) и цветное проявление, в — отбеливание и фиксирование (готовый цветной позитив).



черно-белому отпечатку. В идеальном случае характеристические кривые для каждой из трех эмульсий совпадают во всей области экспозиций. Если же это не так, то цветовой баланс в светах, средних тонах и тенях будет нарушен.

Требования к оптимальной экспозиции и процессу обработки обращаемой пленки намного выше, чем к негативным материалам, поскольку должна быть использована вся шкала плотностей позитива. Более того, стадия печатания может быть использована для исправления экспозиционных ошибок. Если пленка переэкспонирована, но нормально обработана, то позитив будет неплотным и выглядит «выбеленным». Если же пленка недоэкспонирована и нормально обработана, то изображение будет излишне темным.

Диапазон яркостей светов и теней средней сцены обычно составляет 160/1, что соответствует интервалу логарифмов экспозиций 2,2.-

Рис. 12.7.

Характеристические кривые профессиональной фотопленки Kodak Ekta-chrome 64.

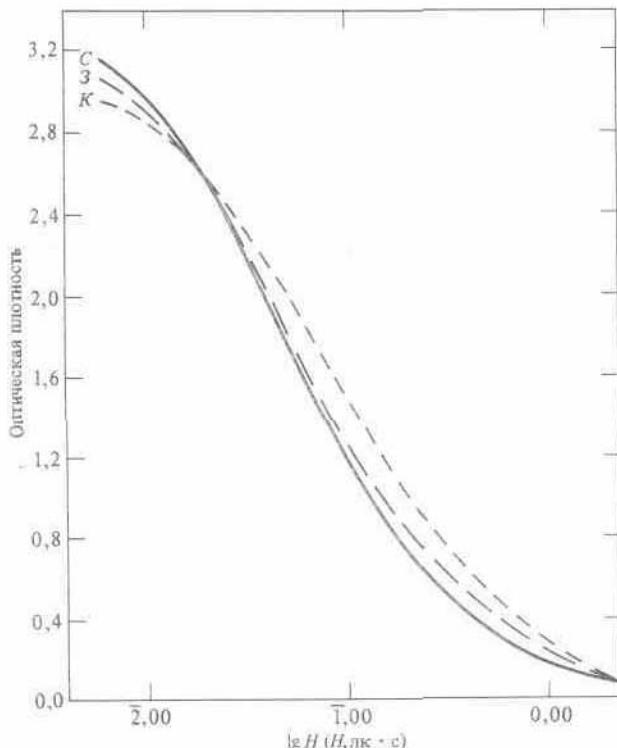
Если же в изображении имеются яркие блики и глубокие тени, то интервал яркостей увеличивается до 1000/1, а интервал логарифмов экспозиций — до 3. Обычно допустимый интервал логарифмов экспозиций для фотопленки (рис. 12.7) не превышает 2,7. Прямолинейный участок характеристической кривой соответствует интервалу логарифмов экспозиции около 2.

**Пример 12.1.** Предположим, что мы фотографируем объект, диапазон яркостей которого составляет примерно 160/1. Для фотографирования объекта используется профессиональная пленка Kodak Ektachrome 64; показать, где на характеристической кривой должен располагаться интервал логарифмов экспозиций для того, чтобы тона внутри указанного диапазона яркостей имели наилучшее линейное разрешение. Определить соответствующий интервал оптических плотностей позитива. Если экспозицию увеличить на одну ступень, то каковы будут соответствующая экспозиция и интервал оптических плотностей?

Если мы одинаково «сожмем» тени и света, то интервал логарифмов экспозиций будет приблизительно такой, как на рис. 12.8, — около 0,15 для минимальной плотности. Если мы проведем измерения, соответствующие «зеленой» кривой, то интервал плотностей будет равен  $3,05 - 0,15 = 2,90$ . Если же экспозицию увеличить на одну ступень (коэффициент 2), то логарифм экспозиции увеличится на 0,3, а максимальные света уйдут из графика вправо.

Рис. 12.8.

Характеристические кривые, показывающие зависимость между  $\lg H$  и  $D$  в примере 12.1.



Интервал плотностей в этом случае будет равен 2,80 — ОД = 2,70. Диапазон яркостей от максимальных в светах до минимальных в тенях в первом случае составляет приблизительно 795/1, а во втором — около 500/1. Поскольку диапазон яркостей исходной сцены составляет 160/1, на первый взгляд кажется, что все позитивы должны быть адекватными. Однако наш фотоаппарат обладает незначительной светорассеивающей способностью, и, кроме того, происходит уменьшение контрастности вследствие условий наблюдения. Последнее может вызываться наличием бликов и (или) окружающим освещением в помещении. Эти эффекты могут легко уменьшать интервал плотностей по крайней мере в четыре раза. Более того, они стремятся смягчить тени, поскольку темные участки изображения в позитиве становятся светлее из-за рассеянного света, в то время как наиболее яркие участки изменяются относительно

мало (рис. 8.7). Кроме того, увеличенная экспозиция «сжимает» область высоких яркостей. Таким образом, общим эффектом может быть снижение контрастности позитивного изображения.

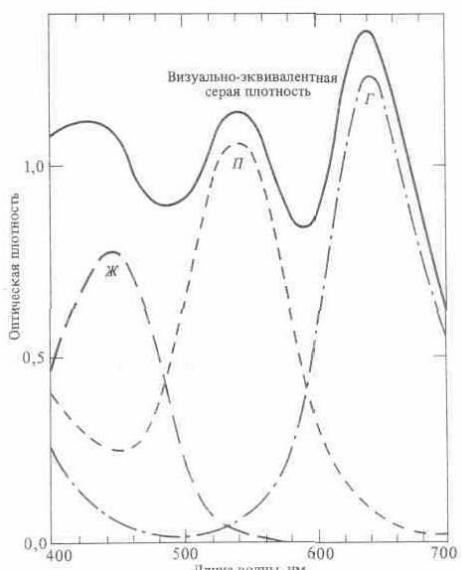
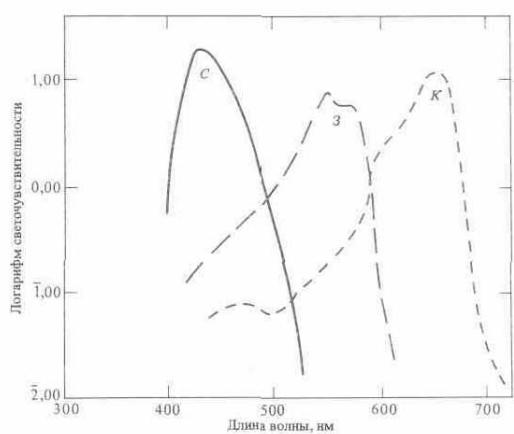
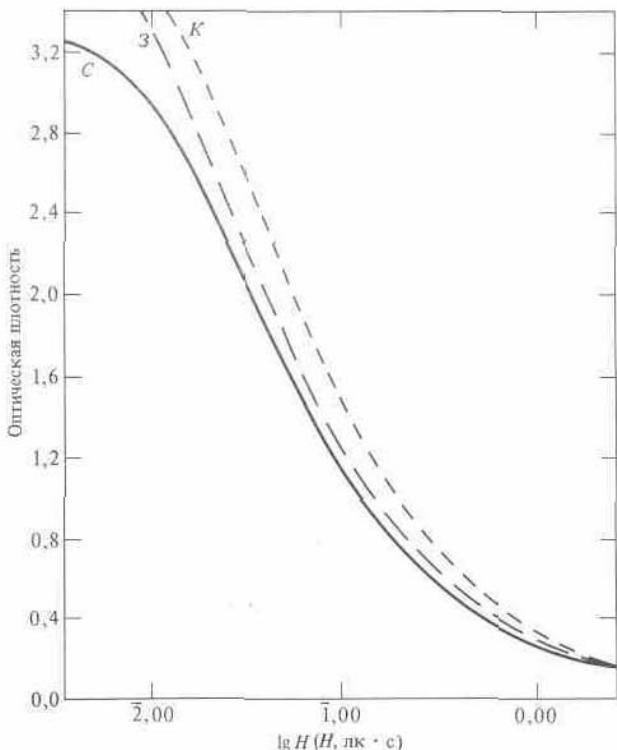
Сравнительные характеристики **фотопленок** типа Ektachrome и Kodachrome. В популярных фотожурналах в свое время было опубликовано значительное число статей, посвященных относительным достоинствам и недостаткам фотопленок, к которым в процессе их обработки добавляются краскообразующие вещества (например, Kodachrome), и пленок, в которые эти вещества вносятся в процессе их изготовления (например, Ektachrome). В конце концов выбор пленки достаточно субъективен, так как глаз зрителя является главным судьей конечного результата. Однако имеет смысл упомянуть о тех технических сторонах, которыми они отличаются друг от друга.

**Пример 12.2.** Сравним профессиональную пленку Ektachrome 64 с пленкой Kodachrome 64. (Обе пленки предназначены для съемок при дневном свете).

Профессиональная пленка Ektachrome 64 для сохранения ее паспортных характеристик до и после экспозиции должна храниться в холодильнике. Пленка Kodachrome 64 не нуждается в охлаждении, поскольку изготовлена с учетом изменений, происходящих в ней за время хранения и обработки при комнатной температуре до и после экспозиции. Обычно эти изменения касаются краскообразующих веществ. Так как пленка Kodachrome не содержит краскообразующих веществ до начала химической обработки, ее стабильность практически такая же, как и у черно-белой пленки, и она более стабильна, чем пленка Ektachrome до проявления. Однако следует отметить, что пленка Kodachrome обладает лучшими характеристиками, которые сохраняются при ее содержании в темноте.

Сравнение характеристических кривых этих двух пленок (рис. 12.7 и 12.9) указывает на

незначительное преимущество



**Рис. 12.9.**

Характеристические кривые фотопленки Kodachrome 64  
**Рис. 12.10.**

Кривые спектральной чувствительности фотопленки Kodachrome 64

Ektachrome, поскольку все кривые (*K*, *3* и *C*) для этой пленки практически совпадают. Спектральные чувствительности можно сравнить, исходя из рис. 12.4 и 12.10. Кривые в обеих сериях имеют близкую форму и относительно резкие границы при больших длинах волн, а при коротких длинах волн резкую границу имеет только кривая слоя, чувствительного к синему цвету. Однако кривые чувствительности для красного и зеленого цветов пленки Kodachrome не обладают такой же резкой границей при коротких длинах волн, как у пленки Ektachrome. Если сравнивать спектральные чувствительности пленки и колбочек глаза, то Kodachrome обладает небольшим преимуществом перед Ektachrome (рис. 6.5).

Кривые оптической плотности спектральных тонов можно сравнить, исходя из рис. 12.5 и 12.11.

Кривые визуально-эквивалентной серой плотности двух пленок отличаются друг от друга, но, по-видимому, это отличие не играет никакой роли. Кривые для отдельных слоев представляют плотность как функцию длины волны.

Теоретически желтый краситель должен поглощать только синий цвет (короткие длины волн), пурпурный — зеленый (промежуточные длины волн) и голубой — красный (большие длины волн). К сожалению, пурпурные красители частично поглощают в области коротких длин волн, причем это поглощение у пленки Kodachrome более сильное.

Голубой краситель, используемый в пленке Ektachrome, незначительно поглощает в диапазоне средних и коротких длин волн. Голубой краситель Kodachrome меньше поглощает, чем у Ektachrome, в диапазоне средних длин волн, но с увеличением длины волны это поглощение растет быстрее, чем у Ektachrome. Что касается желтого

**Рис. 12.11.**

Спектральные кривые оптических плотностей красителей, используемых в фотопленке Kodachrome 64.

красителя, то здесь не возникает никаких проблем для обеих пленок. Рассмотренное паразитное поглощение исправляется методом маскирования для негативных фотоматериалов (для обращаемых материалов этот метод непригоден). На основании сравнения спектральных кривых оптической плотности красителей можно ожидать, что пленка Ektachrome будет лучше воспроизводить синие цвета, а Kodachrome — зеленые. В приведенном анализе красителей не учитывается влияние различных спектральных чувствительностей рассмотренных пленок.

Частотно-контрастные характеристики, представленные на рис. 12.12, показывают, что пленка Kodachrome обладает лучшей резкостью и точностью воспроизведения деталей, чем

**Рис. 12.12.**

Частотно-контрастные характеристики фотопленок Kodachrome 64 и Ektachrome 64



Ektachrome. Пленка Kodachrome обладает несколько меньшей гранулярностью (гл. 7). Измерения разрешающей способности (гл. 7) показывают, что обе пленки дают идентичное воспроизведение (80 линий/мм) при низкой контрастности, а при высокой контрастности профессиональная пленка Ektachrome лучше (125 линий/мм против 100). И наконец, важно отметить, что пленка Ektachrome может быть обработана потребителем в домашних условиях, в то время как Kodachrome — только в специальных лабораториях. По-видимому, нельзя однозначно сказать, какая из них лучше. Как уже отмечалось, их различия могут повлиять на выбор в зависимости от назначения, условий применения и вкуса фотографа.

#### Цветные негативные материалы

Обычно цветные негативные пленки имеют такое же строение, как и обращаемые пленки (рис. 12.13). Краскообразующие вещества вводят в каждый из трех слоев эмульсии во время изготовления пленки. Проявленные негативные пленки, однако, имеют оранжевую окраску из-за вводимых в них маскирующих компонентов. Не будем пока принимать во внимание окраску пленки за счет маскирующих компонентов, а будем считать, что каждый слой обладает соответствующим субтрактивным первичным цветом (рис. 12.13). Эмульсии цветной фотобумаги имеют такое же строение, как и цветная фотопленка, за исключением того, что желтый фильтровый слой не включен по причине, упомянутой выше. Краскообразующие вещества так же, как и для пленки, вводятся в эмульсию во время ее изготовления (рис. 12.13). При производстве фотобумаг маскирующие компоненты в эмульсию не вводятся, а сама эмульсия наносится на бумагу со специальным покрытием, предварительно обработанную сульфатом бария для улучшения ее отражательной способности.

После экспозиции в фотокамере цветные негативные пленки подвергаются цветному проявлению, отбеливанию, фиксированию и промывке, и в результате получается необходимый для печати цветной негатив. Чтобы получить цветной отпечаток, негативное изображение экспонируется на цветную фотобумагу с помощью увеличителя для цветной печати<sup>1)</sup>. Чтобы скорректировать разбалансированность негатива, устранить влияние маскирующих компонент и учесть цветовую температуру лампы фотоувеличителя, применяют соответствующие фильтры. После экспонирования фотобумагу подвергают цветному проявлению, отбеливанию, фиксированию и промывке и в результате получают отпечаток, цвета и тона которого соответствуют снятому объекту.

\* В цветной печати необязательно применять специальные цветные фотоувеличители. Можно использовать стандартный фотоувеличитель, снабженный приспособлением для установки на пути светового пучка различных корректирующих цветовых светофильтров — *Прим. перев.*

**Рис. 12.13.**

Схема строения обращаемой и негативной цветных фотопленок



обозначают цвета красителей; С (синий), З (зеленый) и К (красный) — эффективные чувствительности различных эмульсионных слоев; С (синий), З (зеленый), К (красный), Б (белый) и Ж (желтый) со стрелками — окраску света, падающего на слои или проходящего сквозь них.

На рис. 12.14 представлена схема процесса получения цветного изображения с помощью негатива, на котором сфотографирован объект, состоящий из красной (К), желтой (Ж), черной (Ч) и белой (Б) частей. Буквы Ж (желтый), П (пурпурный) и Г (голубой)

Штриховкой выделены те участки пленки, которые подверглись действию света во время экспозиции.

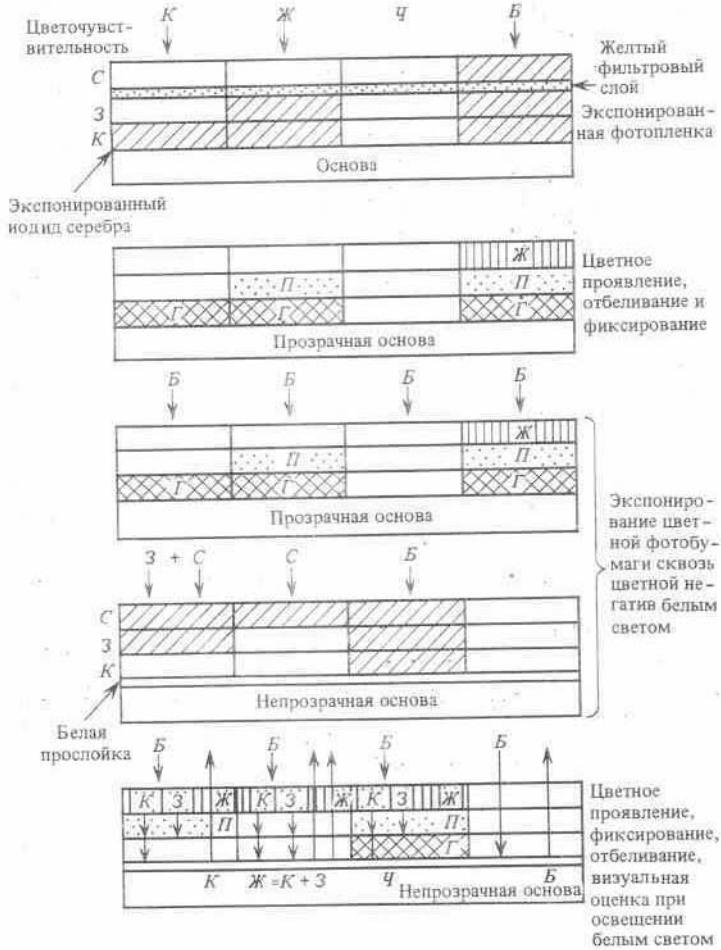


Рис. 12.14,  
Схема получения цветного фотоотпечатка с использованием негативно-позитивного процесса

### Искажения, вносимые красителями, и\внутреннее маскирование

Как было показано в примере 12.2, красители, используемые в цветных обращаемых фотоматериалах, обладают некоторыми недостатками. То же самое можно сказать и о красителях, используемых в цветных негативных пленках и фотобумагах. Если желтый краситель практически не имеет вредного зонального поглощения, то любой голубой краситель обладает частичным поглощением зеленого и голубого света, а пурпурный поглощает некоторое количество синего света.

Поскольку при воспроизведении цвета нейтрально-серый должен выглядеть серым, общее поглощение синей, зеленои и красной частей спектра должно быть приблизительно одинаковым

(рис. 12.5). Если пурпурный и голубой красители обладают слишком большим поглощением в голубой части спектра, то количество желтого красителя, которое необходимо внести в пленку для устранения вредного поглощения, должно быть уменьшено (рис. 12.11). Следовательно, даже если средний снимок обладает хорошей цветопередачей, желтые цвета будут ненасыщенными. Чаще всего фотографируют людей, и, поскольку их лица содержат значительное количество оттенков желтого цвета, снимки не будут правильно воспроизводить цветовые тона. Поэтому необходимо идти на компромисс между передачей цветов кожи и точностью воспроизведения нейтрально-серых тонов. Если же для устранения искажения цветопередачи используется специальный фотографический процесс (маскирование), то обычно имеют место два вида искажений цветопередачи. Во-первых, искажаются относительные яркости и насыщенности различных цветовых тонов (например, синие, голубые и зеленые тона воспроизводятся слишком темными по сравнению с красными, оранжевыми и желтыми). Во-вторых, происходит смещение цветовых тонов. Так, красные смещаются в область более коротких длин волн (к оранжевым) так же, как и зеленые (к синим). Поэтому пурпурные тона содержат больше красного цвета, а голубые — больше синего.

Маскирование представляет собой процесс управления передачей изображения таким образом, что цветовые тона части изображения претерпевают изменения в процессе печатания цветного изображения. В фотографии этот процесс обычно осуществляют в фотолаборатории во время фотопечати. До известной степени такие используемые в черно-белой печати методы, как «вытягивание» и притемнение отдельных участков изображения, тоже являются примерами внешнего маскирования. В более сложных приемах фотопечати часть изображения негатива (строго по контурам) может быть затенена, чтобы осуществить дополнительное частичное вмешательство в экспозицию фотобумаги. Метод маскирования применяется не только в фотографии, но также в полиграфической печати и при электронном способе получения видеоизображений. Маскирование, управляемое компьютером, используется при обработке видеоизображений, полученных с помощью космических аппаратов.

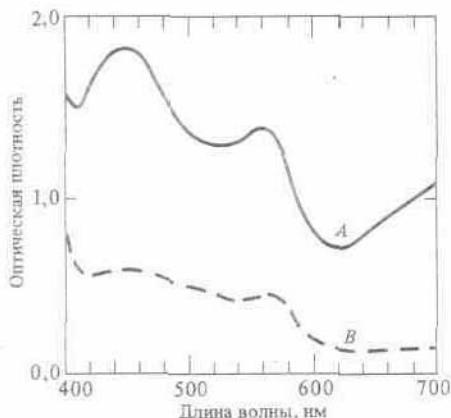
В цветной фотографии метод маскирования можно применять для уменьшения вредного поглощения света красителями. Мaska может быть негативной или позитивной и использоваться с негативом или позитивом. Она может быть изготовлена копированием оригинала на черно-белую пленку с использованием соответствующего светофильтра. Черно-белое изображение проявляют до соответствующей (обычно низкой) контрастности, производят точное совмещение контуров изображения оригинала и маски и полученную таким способом «пару» используют при фотопечати. Как указывалось выше, краскообразующие вещества, используемые в обращаемых фотоматериалах, остаются бесцветными до тех пор, пока не подвергаются цветному проявлению. В то же время краскообразующие вещества в современных цветных негативных фотоматериалах подбирают так, что они играют роль масок, служащих для исправления недостатков краскообразующих веществ. В пурпурное краскообразующее вещество зеленочувствительного слоя до цветного проявления добавляется желтый краситель, который частично поглощает синий цвет. В тех участках зеленочувствительного слоя, где имело место цветное проявление, краскообразующее вещество меняет цвет с желтого на пурпурный. На остальных участках зеленочувствительного слоя краскообразующее вещество остается желтоокрашенным. Плотность желтого красителя сравнима с плотностью нежелательной желтой составляющей, образующейся при цветном проявлении пурпурного красителя. В результате на пленке образуется равномерно распределенный по площади изображения желтый фильтр.

Голубое краскообразующее вещество в красночувствительном слое имеет до проявления розовую окраску и частично поглощает синий и зеленый свет. Это поглощение соответствует нежелательному поглощению синего и зеленого света голубым красителем. После цветного проявления общим эффектом является как бы наложение однородного по площади изображения розового фильтра. Оба маскирующих фильтра придают цветному негативу оранжевый оттенок. При цветной фотопечати варнируют цвет копировального освещения увеличителя<sup>1)</sup> для коррекции маскирующих фильтров и в результате

1) Фотоувеличители для цветной печати снабжаются устройствами для установки между источником света и негативом корректирующих светофильтров. Корректировка света достигается также с помощью цвето-смесителей, вмонтированных в корпус специальных объективов (пример — польский объектив «Янполькодор»), которые устанавливаются в фотоувеличитель. Цветосмеситель представляет собой систему светофильтров дополнительных (желтого, пурпурного и голубого) цветов. Эти светофильтры расположены между линзами объектива в его оптическом центре. Взаимным перемещением светофильтров изменяют спектральный состав излучения копировального света. В последнее время широкое распространение приобретают так называемые цвето-

**Рис. 12.15.**

Спектральные кривые оптических плотностей фотопленки Kodacolor II Кривая A — усредненная плотность, соответствующая 18%-ному серому эталону кривая B — минимальная плотность фотопленки



получают более правильную передачу цветов объекта в фотоотпечатке.

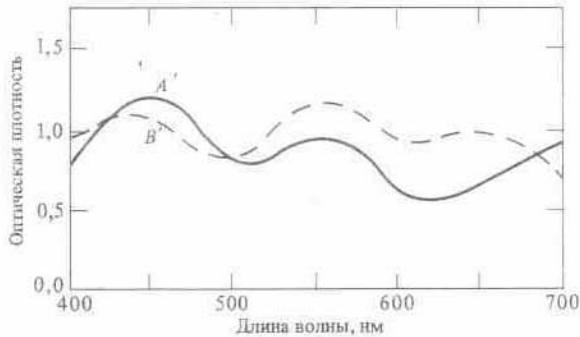
Спектральные кривые оптической плотности красителей для типичной цветной негативной пленки представлены на рис. 12.15. Эти кривые представляют усредненную оптическую плотность для нейтрально-серого контрольного объекта (A) и минимальную оптическую плотность (B) самой фотопленки. Кривая B по сути дела представляет изменение оптической плотности маски в зависимости от длины волны. Кривая A описывает общую плотность негативного изображения средней шкалы нейтрального серого тона и маски

**Пример 12.3.** Разность между спектральными кривыми A и

B оптической плотности красителя на рис. 12.15 представляет визуально-эквивалентную серую плотность красителя после корректировки вредного поглощения пурпурного и голубого красителей. Построим эту кривую и сравним ее с визуально-эквивалентной серой плотностью красителя для типичной цветной обращаемой фотопленки (рис. 12.5). Для этого вычтем из значений оптической плотности на кривой A соответствующие значения (для одинаковых длин волн) оптической плотности на кривой B — в результате получим кривую, показанную на рис. 12.16 (кривая A'). Например, плотность на кривой A при 400 нм равна 1,57, а минимальная плотность составляет 0,77, и их разность имеет значение 0,80. Для сравнения на рис. 12.16 представлена визуально-эквивалентная серая плотность для профессиональной обращаемой фотопленки Ektachrome 64 (кривая B'). Аналогичные значения оптической плотности для пленки Ektacolor при увеличении длины волны уменьшаются сильнее, чем для пленки Ektachrome. Поскольку

фотопленка Ektacolor применяется для получения отпечатков, это уменьшение несущественно. Для коррекции эффекта можно изменять цветовую температуру источника света фотоувеличителя. ловки, устанавливаемые на фотоувеличитель вместо фонаря Корректировка цвета осуществляется с помощью светофильтров, вводимых в световой поток лампы, путем вращения трех ручек, вынесенных на переднюю панель прибора — *Прим персе Рис. 12.16.*

Сравнение визуально-эквивалентных серых плотностей фотопленок Kodacolor II и Ektachrome 64. Кривая  $A'$  представляет разность значений на кривых  $A$  и  $B$  (рис 12.15) в зависимости от длины волны. Кривая  $B'$  — визуально-эквивалентная серая плотность профессиональной фотопленки Ektachrome 64



Качественно кривые  $A'$  и  $B'$  идентичны.

Характеристические кривые для типичных цветных негативных фотопленок представлены на рис. 12.17. Напомним, что эти кривые описывают оптическую плотность красителей в проявленной фотопленке. Плотность фотопленки измеряют в красной ( $K$ ), зеленой ( $Z$ ) и синей ( $C$ ) областях спектра, используя соответствующие цветные светофильтры, подобранные таким образом, чтобы быть совместимыми со спектральной чувствительностью фотобумаги. Как правило,

чувствительностью фотобумаги. Как правило,

негатив используется для получения цветного отпечатка. Следовательно, решающим обстоятельством является то, как фотобумага «видит» негатив. Фотопленка обладает наибольшими плотностями в синей области спектра и наименьшими в красной вследствие маскирования красителей и меньшего количества голубого и пурпурного красителей.

Часто диапозитивы, получаемые на цветных обращающихся фотопленках, используются для изготовления цветных отпечатков или копий оригиналов. В этом случае применяют цветную обращаемую фотопленку (для получения копий диапозитивов) или цветную обращаемую фотобумагу. При этом нет необходимости использовать метод маскирования для цветокорректировки.

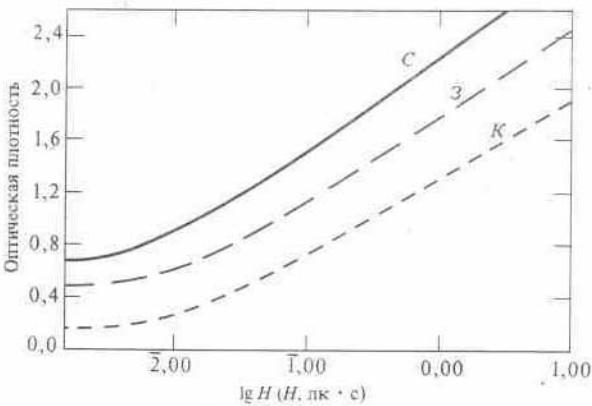


Рис. 12.17.

Характеристические кривые фотопленки Kodacolor II. Цветные диапозитивы и отпечатки также можно изготавливать с помощью промежуточного цветного негатива<sup>1</sup>, для получения которого используют самомаскирующиеся цветные фотопленки, устраняющие разбалансировку цветов оригинала. Промежуточные негативы для внешнего маскирования могут быть изготовлены на черно-белой фотопленке с помощью соответствующих светофильтров. Этот способ позволяет осуществить маскирование, хотя подбор светофильтров довольно сложен.

Промежуточный негатив любого типа может быть использован в методе фотопечати с переносом цвета.

У читателя может возникнуть вопрос о пригодности метода маскирования, если иметь в виду частичную потерю информации вследствие экранирования красителей. Не происходит ли при этом уменьшения числа различных деталей изображения при ухудшении разрешающей способности фотопленки или используемого фотообъектива? В этом случае нельзя воспроизвести информацию, не зарегистрировав ее. Как только размеры деталей предмета становятся меньше предельного разрешения фотопленки или фотообъектива, одна линия может восприниматься наблюдателем как две или более линий. Искажения в цвете, вызванные нежелательным поглощением пурпурного и голубого красителей, могут быть определены на основе спектральных кривых оптических плотностей красителей, и, следовательно, можно осуществить соответствующие корректировки методом маскирования. Пусть  $A$  соответствует истинным цветам предмета,  $B$  — нежелательным поглощениям пурпурного и голубого красителей,  $C$  — конечное изображение. В этом случае можно записать  $A - B = C$ . Так как  $B$  и  $C$  известны, для того чтобы получить снимок, цвета которого были бы адекватны цветам исходного предмета  $A$ , необходимо  $B$  прибавить к  $C$  или  $A - B + C$ . Это и есть принцип маскирования. В случае ухудшения изображения вследствие ограничений, налагаемых разрешающими способностями фотопленки и фотообъектива, величина  $B$  не постоянна и зависит непосредственно от объекта. Например, если не разрешаются две или три линии, то для каждого из этих случаев величина  $B$  разная. Источники света для цветной фотографии В гл. 10 было показано, что один из важнейших факторов

цветной фотографии — цветность источника света. Восприятие цвета объекта зависит от спектрального состава освещдающего его света. Следовательно, если объект рассматривается при солнечном свете или при свете ламп накаливания, то свет, отраженный от него, будет различным, и поэтому цветные снимки, полученные на одной и той же цветной фотопленке, в этих двух случаях будут разными. Поскольку в каждой ситуации глаз в отличие от фотопленки адаптируется к изменениям освещения,

Чтобы правило, промежуточный негатив получают из оригинала контактным способом — *Прим. перев.* он практически не будет замечать цветовых искажений, вызванных различными условиями освещения. Однако если объект фотографируется в разных условиях освещения и его снимки затем рассматриваются при одном и том же освещении, то они будут казаться разными, а один из них — несоответствующим действительности. Поэтому для преодоления возникающих сложностей спектральная чувствительность цветных пленок сбалансирована так, что при использовании с определенным источником света получающиеся снимки воспринимаются как «естественные».

Человек обладает способностью точно контролировать правильность цветопередачи лица и кожи на снимке. Фотография будет казаться естественной, если тона кожи выглядят на снимке такими же, какими их привык видеть глаз. Так как лампы накаливания испускают меньше коротковолнового излучения, чем солнце, фотопленки, предназначенные для съемок при свете ламп накаливания, обладают повышенной чувствительностью к коротковолновой области спектра. Сравнивая рис. 12.4 и 12.18, легко убедиться в увеличении чувствительности к синему цвету фотопленки, используемой для съемок при свете ламп накаливания. Профессиональная фотопленка Kodak Ektachrome 50 сбалансирована для применения без светофильтров с источниками света, цветовая температура которых составляет 3200 К. Цветная фотопленка, предназначенная для съемок при дневном освещении, сбалансирована для цветовой температуры 5500 К. Некоторые фотопленки сбалансированы для 3400 К (например, Kodachrome 40 5070). Перекаленные фотолампы, не бывшие в употреблении, дают освещение, имеющее баланс, эквивалентный излучению абсолютно черного тела с температурой 3400 К (гл. 10). При старении их цветовая температура уменьшается. Кроме того, выпускаются лампы накаливания, которые в начале своей работы создают свет с цветовой температурой 3200 К. Новые бытовые лампы накаливания создают освещение с цветовой температурой около 2800 К.

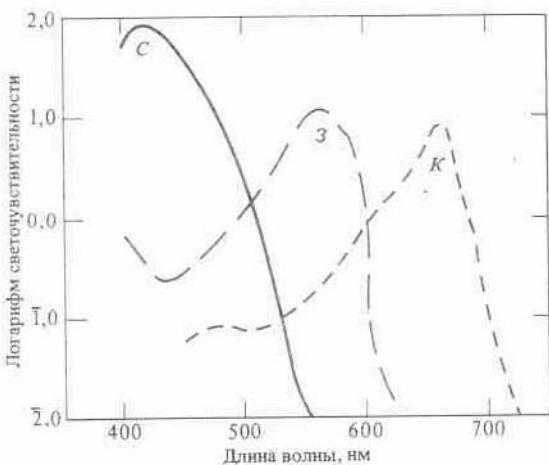


Рис. 12.18.  
Кривые спектральной чувствительности профессиональной фотопленки Kodak Ektachrome 50. Фотопленки, сбалансированные для 3200 К, называются цветными пленками типа В, а для 3400 К — цветными пленками типа А. При использовании пленки типа В с источником света 3200 К или 3400 К различие между получающимися фотоснимками невелико, но заметно. Фотопленка типа В часто используется для съемок при освещении бытовыми лампами накаливания, хотя в этом случае снимки обладают довольно заметной желтой окраской. Если фотопленки типа А или В используются для съемок

при дневном освещении, то в результате получается излишне синее изображение. В случае использования цветной фотопленки при освещении, для которого она не сбалансирована, необходимо применять светофильтры для соответствующей корректировки. Вопросы применения светофильтров изложены в гл. 13.

Как показано выше, спектральная чувствительность глаза к цветам (рис. 6.5) отличается от чувствительности фотопленки, что является еще одной причиной затруднений при изготовлении цветных снимков в случае разного освещения. Эта проблема становится очевидной при фотосъемке с использованием люминесцентного дневного освещения. Например, лицо загорелого человека имеет зеленый оттенок, а седые волосы кажутся зеленоватыми при съемке на цветную фотопленку для дневного освещения при использовании холодно-белого люминесцентного освещения. Это объясняется тем, что глаз реагирует на интенсивное излучение определенных длин волн не так, как фотопленка (рис. 10.2). Значительное перекрывание спектральных чувствительностей сенсоров глаза, воспринимающих зеленые и красные цвета, вероятно, приводит

к тому, что зеленые и желтые составляющие люминесцентного освещения стимулируют эти сенсоры глаза. Эмульсия цветной пленки, чувствительная к красной области спектра и обладающая относительно низкой чувствительностью при более коротких длинах волн, по всей видимости, экспонируется в меньшей степени этими составляющими. Для корректировки этого эффекта также необходимы светофильтры (гл. 13).

#### Определение экспозиции

Чувствительность цветной негативной фотопленки в единицах ASA определяется иным способом, чем чувствительность черно-белой негативной фотопленки. Поскольку цветной фотопленке присущи три характеристические кривые (рис. 12.17), для определения чувствительности пленок в единицах ASA используется среднее  $\lg H$ , необходимое для достижения определенной плотности для красного, зеленого и синего эмульсионных слоев<sup>1</sup>). Критериальные точки (гл. 8) лежат вблизи начального участка характеристической кривой немного выше, чем в случае черно-белых фотопленок. Для определения экспозиции цветной фотопленки можно пользоваться светочувствительно-

<sup>1\*</sup> Todd R N , Zakia R D Photographic Sensitomctr<sup>^</sup> Hastings-on-Hudson, N Y Morgan and Morgan, 1969 p 165tf  
стью в единицах ASA точно так же, как в случае черно-белой фотопленки. Оптимальная экспозиция фотопленки будет соответствовать начальному и прямолинейному участкам характеристической кривой.

Чувствительность цветной обращаемой фотопленки в единицах ASA определяется несколько иным способом, чем для негативных пленок, так как используется полный интервал оптических плотностей фотопленки при съемке. Обращаемой фотопленке также соответствуют три характеристические кривые (рис. 12.7), которые совпадают между собой в большей степени, нежели для негативной цветной пленки. Вместо усреднения при определении чувствительности пленки в единицах ASA для нахождения критериальной точки пользуются характеристической кривой, измеренной с применением желтого светофильтра<sup>1</sup>). Эта точка выбирается как соответствующая средней плотности в области теней, и чувствительность пленки в единицах ASA определяется в зависимости от экспозиции, необходимой для достижения этой плотности.

Светочувствительность пленки, определенная таким способом, может быть использована для нахождения оптимальной экспозиции, как это делается и для других типов пленок.

В примере 12.1 продемонстрировано решающее значение оптимальной экспозиции для обращаемой пленки. В рассмотренном там случае недоэкспонирование должно было бы привести к потере деталей в тенях. Наилучшие результаты обращаемые пленки обеспечивают при их экспонировании и обработке согласно рекомендациям изготовителя. Однако если к качеству снимка не предъявляется строгих требований (допустимо увеличенное зерно и измененный цветовой баланс), то обращаемые пленки могут быть недоэкспонированы до двух ступеней при условии, что время первого проявления увеличено. Передержка на одну ступень может быть скомпенсирована уменьшением времени первого проявления. Согласно способу обработки E-6, который в настоящее время используется для пленок Kodak Ektachrome, рекомендовано увеличение или уменьшение времени первого проявления на 2 мин при изменении экспозиции на одну ступень. Если пленка недоэкспонирована на две ступени, время первого проявления должно быть увеличено на 5<sup>1/2</sup> мин. В некоторых коммерческих способах обработки обращаемых фотоматериалов предусмотрены такие изменения стадий обработки. В результате увеличения времени проявления характеристическая кривая сдвигается влево (рис. 12.7); ее наклон при этом остается практически неизменным.

Нарушение закона взаимозаместимости (гл. 8) для цветной пленки наблюдается при тех же условиях, что и для черно-белой пленки. Вообще говоря, экспозиция должна быть увеличена для экстремально длинных или экстремально коротких экспозиций. Так как нарушение закона взаимозаместимости в

<sup>1></sup> См. сноску на с 344

разной степени затрагивает три регистрирующих слоя пленки, то и чувствительность, и цветовой баланс пленки при этом могут изменяться. Для достижения оптимальной экспозиции кроме увеличения экспозиции следует использовать цветокомпенсационные фильтры. Фирмы, выпускающие фотоматериалы, обычно снабжают фотопленки указаниями по цветокорректировке, которых необходимо придерживаться для достижения наилучшего качества<sup>1</sup>). Большинство цветных пленок не требует коррекции, если время экспозиции не короче 1/1000 с или не длиннее 1/10 с.

#### Обработка цветных фотоматериалов

Не будем останавливаться на подробном изучении процессов обработки цветных фотоматериалов, поскольку они довольно сложны и требуют хорошо оборудованной лаборатории. Что же касается

обращаемых пленок с введенными в эмульсионный слой во время их изготовления краскообразующими веществами, то они могут быть относительно легко обработаны самим пользователем. Для этого необходимо простое оборудование. Кроме того, если в процессе съемки экспозиция отличалась от оптимальной, то проявление в домашних условиях имеет очевидное преимущество, так как возможно изменять время первого проявления для компенсации экспозиционных отклонений. Пользователь должен решать сам, исходя из различных обстоятельств, воспользоваться ли услугами специальных лабораторий или проявлять самому, что экономически более выгодно. В случае обращаемой фотопленки с вводимыми во время химической обработки краскообразующими компонентами приходится пользоваться только услугами специальных лабораторий.

Цветная фотопечать с цветных негативов является более сложным процессом по сравнению с черно-белой печатью. Цветная фотобумага является панхроматической и поэтому должна обрабатываться при полной темноте, что неудобно. Для компенсации маскирования и отклонений от оптимальной экспозиции используется изменение выдержки и цветности освещения при фотопечати, которое достигается с помощью светофильтров. Если маскирование для всей пленки одинаково, то различия каждого негатива, вызываемые разной экспозицией при съемке, могут быть значительными и создавать трудности. В качестве примера можно привести ранее упомянутое люминесцентное освещение, которое может вызывать значительные затруднения при подборе корректирующих фильтров.

Цветовая температура дневного света может изменяться от 5000 до 25 000 К (гл. 10). Поэтому, если съемка проводилась вне помещения без использования светофильтров, в процессе

<sup>11</sup> Kodak Color Films, Eighth Edition, Rochester, N Y Eastman Kodak Co 1980, p DS-55

фотопечати необходимо применять коррекцию света для получения схожих с реальностью снимков. Коррекция света в основном связана с тем, что глаз в отличие от фотопленки способен адаптироваться, а также с разницей спектральных чувствительностей глаза и пленки. Фотопечать проще всего выполнять с помощью специальных фотоувеличителей для цветной печати, снаженных источниками света и дихроичными светофильтрами. В цветной печати хорошие результаты дают фотоувеличители, предназначенные для черно-белой печати, если применять корректирующие светофильтры.

Ошибочно полагают, что цветная печать предоставляет фотографу более широкие возможности для творчества по сравнению с черно-белой печатью. Наличие цвета на фотоснимке создает слишком сильную иллюзию реальности, поэтому этот фактор чаще всего и ограничивает творческие возможности. Как только преодолены условности цвета и признается абстракция серых тонов, фотограф становится свободным в интерпретации окружающего мира. Конечно, свобода в кадрировании, использование различных методов печати сохраняются и в цветной печати, что открывает некоторые возможности для творчества в позитивном процессе. Используя панхроматическую фотобумагу можно получать черно-белые снимки с цветных негативов.

Ранее излагались способы, позволяющие получать цветные отпечатки с диапозитивов. В основе всех этих способов лежит использование краскообразующих компонентов. Одним из процессов является способ с обесцвечиванием красителей, которое осуществляется путем их разрушения при образовании цветного изображения. Светочувствительные слои располагают в той же последовательности, как в обычных цветных фотоматериалах (рис. 12.19). Желтый (*Ж*), пурпурный (*П*) и голубой (*Г*) азокрасители включаются в эмульсионный слой в процессе изготовления фотоматериала.



Рис. 12.19.

Схема получения изображения белого и желтого цвета на фотобумаге Cibachrome. После экспонирования фотобумага проявляется и подвергается отбеливанию, в процессе которого краситель удаляется из тех областей, где присутствовало металлическое серебро, но остается там, где не было серебра. Затем серебро удаляется, фотоотпечаток фиксируется, промывается и стабилизируется. Схематически весь процесс показан на рис. 12.19, когда фотобумага освещается желтым (*Ж*) и белым (*Б*) светом, а часть фотобумаги не освещается (*Ч*). Материал, основанный на процессе отбеливания красителей, выпускаемый фирмой Ciba-Geigy под коммерческим названием Cibachrome, выпускается как на

прозрачной подложке для проекций, так и на пластиковой основе или лакированной бумаге для производства отпечатков.

### **Хранение и использование пленок и снимков**

Чрезмерное воздействие радиоактивности и рентгеновского излучения вызывает в непроявленной цветной пленке такие же изменения, как и в неэкспонированной черно-белой пленке. Экспонированная, но непроявленная пленка подвержена более сильному влиянию радиоактивности и рентгеновского излучения, чем неэкспонированная пленка, вследствие нестабильности скрытого изображения. Что касается флюороскопии, которой пленка подвергается при досмотре багажа в аэропорту, то в этом случае у неэкспонированной пленки возникают лишь незначительные отклонения ее свойств от гарантированных, особенно если пленка находилась в металлической упаковке. Однако все же лучше избегать такого воздействия, в особенности на экспонированную, но непроявленную фотопленку.

Основными факторами, оказывающими вредное влияние на состояние необработанных цветных фотоматериалов, являются высокая температура, повышенная влажность и свет. В цветных фотоматериалах воздействие перечисленных факторов на галогениды серебра точно такое же, как в случае черно-белой фотопленки: необработанные цветные материалы не должны подвергаться освещению, действию тепла и высокой влажности. Лучше всего, если относительная влажность при их хранении поддерживается ниже 50%. Пленки, предназначенные для профессионального использования, и все типы фотобумаги должны храниться при низкой температуре. Пленки общего назначения, рассчитанные на хранение при комнатной температуре, должны содержаться при этой температуре. Однако, если такие пленки после покупки надо хранить длительное время, они должны находиться при низкой температуре. Пленки, в которые краскообразующие вещества вводятся в процесс их обработки, менее чувствительны к высокой температуре и влажности до тех пор, пока они не подвергнуты обработке. Как только заводская упаковка с цветным фотоматериалом вскрыта, необходимо избегать высокой влажности. Если фотоматериал не может быть обработан немедленно, он должен храниться охлажденным. При охлаждении фотоматериала в течение длительного времени необходимо воспользоваться осушителем, например силикагелем. Обработанный цветной материал значительно менее стабилен по сравнению с соответствующим черно-белым фотоматериалом, что объясняется меньшей устойчивостью красителей, чем зерен серебра. Свет, высокие влажность и температура со временем вызывают порчу любых фотоизображений. Фотоснимки, которые часто рассматривают, или многократно используемые диапозитивы ухудшаются вне зависимости от того, как осуществляется просмотр. Если восстановление изображений невозможно, то лучше всего сделать их копии для пользования, а оригиналы содержать в специальных архивах. Лучше всего фотоматериалы хранить в герметически запечатанном металлическом контейнере, содержащем осушитель, при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$  и ниже. Обработанные фотоматериалы необходимо хранить в металлической свето- и влагонепроницаемой коробке при низкой температуре все то время, пока они не используются. Металлические упаковки более предпочтительны по сравнению с пластиковыми или деревянными, так как из последних могут выделяться вещества, влияющие на красители.

Даже незначительное снижение температуры удлиняет срок годности фотоматериала. Например, одна из фирм-изготовителей<sup>1)</sup> ввела оценки срока годности фотопленки, исходя из уменьшения ее оптической плотности. Например, если температура хранения снижается с  $30$  до  $24^{\circ}\text{C}$ , то срок годности увеличивается в два раза, если до  $13^{\circ}\text{C}$  — в восемь раз, если до  $-18^{\circ}\text{C}$  — в  $680$  раз.. Так как относительная влажность в холодильниках очень высокая, фотоматериалы должны быть надлежащим образом запечатаны и осушены до помещения в холодильник. Когда фотоматериал достают из холодильника, его необходимо выдержать некоторое время в сухом месте (пока он не нагреется до комнатной температуры).

Цветные фотоматериалы, полученные методом переноса красителя или, с отбеливанием красок, обычно более стабильны, чем трехслойные фотоматериалы, цвет которых создают вводимые цветные компоненты.

### **Выбор фотопленки**

При выборе черно-белых пленок фотографу приходится каждый раз обращать внимание на светочувствительность и разрешающую способность. В цветной фотографии проблема отбора пленки усложняется в связи с наличием большего числа характеристик.

Отдается предпочтение обращаемому или негативному фотоматериалу в основном в зависимости от того, какое изображение требуется получить — в виде диапозитива для проекции или в виде отпечатка.

<sup>1</sup>> Kodak Color Films, p 33

Использование обращаемых фотоматериалов обходится дешевле, поскольку относительно большие изображения можно получить с помощью диаскопа или диапроектора, что исключает необходимость изготовления увеличенных фотоотпечатков. Негативные фотоматериалы позволяют получать снимки в обычной обстановке, удобные для рассматривания. В негативных фотоматериалах может быть использован метод маскирования, поэтому фотоснимок дает более точное воспроизведение цветов, однако интервал яркостей больше у диапозитивов при проецировании изображений на экран.

Диапозитив, являющийся оригиналом, может быть изготовлен с лучшей проработкой деталей по сравнению с фотоотпечатком, так как получение копий всегда приводит к ухудшению воспроизведения деталей. Фотоотпечаток, полученный с диапозитива, не будет иметь такого же качества, как при изготовлении с негатива; это объясняется тем, что при изготовлении отпечатка на обращаемой фотобумаге не может быть использовано маскирование, а для получения промежуточного негатива требуется изготовление дополнительной копии, что приводит к ухудшению проработки деталей.

Если предпочтение отдано обращаемому фотоматериалу, то при этом надо сделать выбор между пленками, в которые краскообразующие вещества вводятся во время их изготовления (недиффундирующие краскообразующие компоненты) или в процессе их обработки (диффундирующие краскообразующие компоненты) (пример 12.2). Делая вывод, можно сказать, что фотопленки с недиффундирующими цветными компонентами более стабильны, чем пленки с диффундирующими цветными компонентами.

Малочувствительные фотопленки с диффундирующими цветными компонентами позволяют получать лучшую проработку деталей, чем фотопленки с недиффундирующими краско-образующими веществами. Последние, однако, являются более светочувствительными. Выбор цветового баланса определяется с помощью пробных съемок и может зависеть от особенностей фотографируемого предмета.

Пленки с диффундирующими цветными компонентами нуждаются в обработке в специализированных лабораториях, в то время как пленки с недиффундирующими цветными компонентами могут обрабатываться в домашних условиях, что в определенных обстоятельствах является преимуществом. Пленки с недиффундирующими цветными компонентами делятся на пленки общего назначения и на профессиональные пленки. Если пленки последнего типа хранятся при комнатной температуре, то их цветовой баланс нарушается. Пленки же общего назначения можно хранить при комнатной температуре. В этих пленках цветовой баланс подбирается во время их изготовления. Изменения, которые происходят при старении пленки, в среднем не искажают цветовой баланс при ее экспонировании и обработке. Профессиональные пленки с недиффундирующими краскообразующими веществами сбалансированы по цвету (при условии незамедлительной съемки и содержания при низкой температуре) для того, чтобы изменение цветового баланса было минимальным. В большинстве случаев цветовой баланс пленок определяется экспериментально и для каждой партии профессиональной фотопленки указывают необходимые корректирующие светофильтры. Если необходимо совершенно точное воспроизведение цвета, то используют профессиональную пленку и обработку, предписанную изготовителем. В большинстве случаев пленки общего назначения обеспечивают удовлетворительные результаты. Если же профессиональная пленка обрабатывается не в установленном порядке, то она во многих случаях будет давать худшие результаты, чем пленка общего назначения.

Те же ограничения, которые определяют выбор чувствительности черно-белой фотопленки, играют главную роль и при выборе чувствительности цветной фотопленки. Определив оптимальные выдержку и относительное отверстие диафрагмы, необходимые в конкретной ситуации, следует воспользоваться наименее чувствительной пленкой, обеспечивающей оптимальную экспозицию. Этот совет является чрезвычайно важным в малоформатной фотографии, так как зернистость цветных изображений является такой же проблемой, как в черно-белой фотографии.

Чтобы сохранить малым размер зерен в эмульсии и в то же время получить пленки с высокой чувствительностью, фирма Kodak разработала цветную фотопленку с ориентированными зернами особой формы. Зерна галогенида серебра в негативной пленке Kodacolor VR 1000 обладают плоской формой и ориентированы своим наименьшим размером в одном направлении перпендикулярно плоскости пленки. Таким образом, индивидуальные зерна могут поглощать относительно большее число фотонов без пропорционального увеличения общего количества галогенида серебра в зернах, что и повышает их светочувствительность. Когда экспонированные зерна подвергаются цветному проявлению, в серебро превращается меньшее количество галогенидов серебра, и общее количество красителя, образованного на зернах, уменьшается, создавая мелкозернистое изображение. Так как обычные зерна галогенида серебра не обладают плоской формой, такой метод не может быть использован для увеличения чувствительности обычных фотопленок. Кроме новой формы зерна вводятся изменения в некоторые слои эмульсии, что также увеличивает светочувствительность пленки.

Например, стандартно обработанная фотопленка Kodacolor VR 1000, обладает чувствительностью 1000 ASA.

В настоящее время цветные пленки общего назначения производятся в США фирмами Agfa-Gevaert, Fuji, 3M и Kodak. Фирма Ilford не изготавливает цветных фотопленок, но выпускает в дополнение к обычным черно-белым пленкам так называемые хромогенные черно-белые пленки. Фирмы Agfa-Gevaert и Kodak выпускают черно-белые пленки, а Agfa-Gevaert — и хромогенную черно-белую пленку. Самый широкий ассортимент пленок производится фирмой Kodak. Данные о всех известных современных типах пленок приведены в регулярно издаваемом каталоге Photo Lao Index<sup>1)</sup>.

### **Хромогенные** фотопленки

Хромогенные черно-белые фотопленки представляют собой негативные фотоматериалы, в которых для создания однотонных изображений используются краскообразующие вещества. Такого типа фотопленки применяются для получения черно-белых отпечатков. Некоторые пленки содержат несколько слоев эмульсии, что позволяет улучшить их светочувствительность. Отметим, что все эмульсионные слои являются панхроматическими. Краскообразующие вещества вводятся в пленку во время ее изготовления. Пленка обрабатывается точно таким же способом и теми же самыми химическими веществами, что и цветной негативный материал. Получающийся негатив содержит цветные красители, но не содержит серебра (некоторые эмульсии имеют незначительную красноватую окраску).

Фирма Agfa-Gevaert распространяет этот тип фотопленки под маркой Agfapan Vario-XL, а фирма Ilford — под маркой XP-1400. Эти фотопленки обладают переменной светочувствительностью. Так, чувствительность пленки XP-1400 может изменяться от 100 до 1600 единиц ASA при неизменном времени ее обработки (оптимальная чувствительность пленки составляет около 400 единиц ASA). Так как проявитель для хромогенных фотоматериалов превращает краскообразующие вещества, прилегающие к проявленному зерну, в цветной краситель, эти «зерна» не похожи на обычные зерна проявленного серебра. Они не имеют резких границ и выглядят как расплывчатые облака с размытыми краями. С увеличением экспозиции (при этом чувствительность пленки уменьшается) эти облака перекрываются и резкость изображения уменьшается, но ощущение зернистости в действительности может уменьшаться благодаря диффузной природе границ зерна. Поэтому фотопленку можно даже переэкспонировать и в то же время получить приемлемые отпечатки с негатива. Недоэкспонирование приводит к возникновению проблем, аналогичных тем, с которыми сталкиваются при недоэкспонировании обычной черно-белой пленки. Согласно имеющимся данным, варьирование процесса проявления не приводит к улучшению качества негатива. По всей видимости, пленки этого типа покажут существенное влияние на расширение возможностей черно-белой фотографии. Поскольку изображение создается проявлением красителем,

<sup>1)</sup> Photo Lab Index M&M, Lifetime Edition, Dobbs Fern, N Y Morgan and Morgan, Inc вероятно, со временем оно будет ухудшаться быстрее, чем серебряное изображение.

### **Инфракрасная** пленка

Производится как черно-белая, так и цветная фотопленка, чувствительная к инфракрасным лучам. Спектральный диапазон чувствительности обоих типов коммерчески доступных пленок простирается приблизительно до 900 нм, что достигается введением соответствующих сенсибилизаторов, принцип действия которых аналогичен принципу, используемому для расширения спектральной чувствительности ортохроматической или панхроматической фотопленки. Кроме того, существуют специальные приборы, регистрирующие инфракрасное излучение с длинами волн вплоть до 10 000 нм<sup>1)</sup>. Максимальная длина волны, которая может быть зарегистрирована с помощью фотографических методов, составляет приблизительно 1350 нм. Инфракрасные пленки общего назначения<sup>2)</sup> обладают чувствительностью к длинам волн, более коротким, чем 900 нм, что сделано для упрощения обработки пленки. Так как эти фотопленки чувствительны также к видимому и ультрафиолетовому излучениям, при съемке необходимо пользоваться специальными фильтрами, не пропускающими свет видимой области спектра. Инфракрасная цветная пленка, выпускаемая фирмой Eastman Kodak под наименованием Kodak Ektachrome Infrared Film, является хромогенной пленкой и иногда называется *пленкой с условным цветовоспроизведением*<sup>3)</sup>. Эта трехслойная обращаемая пленка всегда используется с желтым светофильтром и разработана таким образом, чтобы синие (C), зеленые (3), красные (K) и инфракрасные (ИК) лучи, испускаемые предметом, переходили соответственно в черные (Ч), синие, зеленые и красные цвета в проявленном диапозитиве (рис. 12.20). Верхний слой пленки чувствителен к синим и инфракрасным лучам, средний — к зеленым и синим, нижний — к

красным и синим. При использовании желтого светофильтра верхний слой эмульсии поглощает инфракрасные лучи, средний — зеленые, нижний — красные. Фотопленка подвергается такой же обработке, как и все остальные цветные обращаемые фотопленки (табл. 12.1). На тех же участках пленки, где происходит проявление, возникает окраска: в верхнем слое — голубая ( $\Gamma$ ), в среднем — желтая ( $\Ж$ ), в нижнем — пурпурная ( $\Pi$ ). Аналогично предыдущим рассуждениям и используя схему, представленную на рис. 12.20, читатель легко может понять механизм образования цветного изображения.

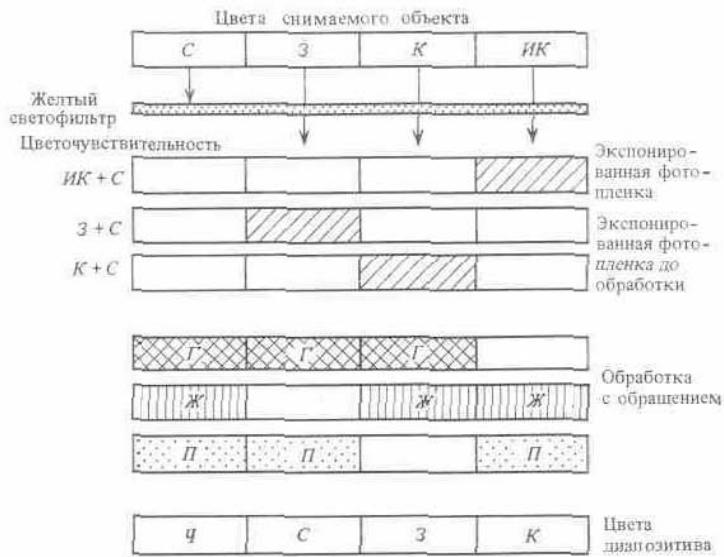
" Такие приборы называются тепловизорами и позволяют преобразовывать инфракрасное излучение тел в видимое. Современные тепловизоры обладают способностью воспринимать излучение с длинами волн вплоть до 12 000 нм и на расстоянии до 10—15 км. — Прим. перев.

<sup>2</sup>> Так называемые инфрахроматические фотоматериалы. — Прим. перев.

<sup>3</sup>) В отечественной литературе подобные фотоматериалы принято называть спектрональными. — Прим. ред.

Рис. 12.20.

Схема цветообразования в инфракрасной цветной фотопленке.



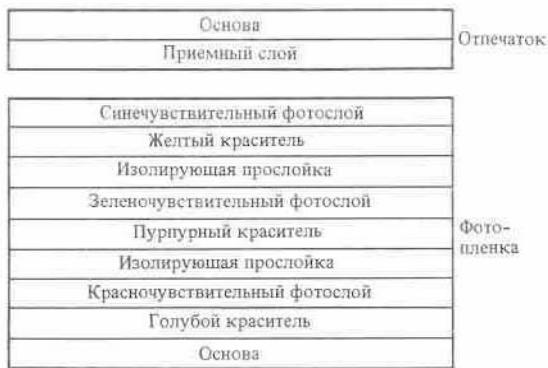
составляют около 0°C. Эти «тепловые» зоны обладают повышенным нагревом только относительно соседних, изолированных поверхностей. Поэтому необходимо использовать специальные устройства, способные регистрировать инфракрасное излучение. Более подробно эти вопросы изложены в публикации фирмы Kodak M-28<sup>1^<</sup>.

#### Одноступенчатый способ получения цветного изображения

Впервые одноступенчатый способ получения цветного изображения был изобретен Э. Лендом в 1947 г. Фотопленка, используемая в этом методе, называется «Полаколор» и выпускается до настоящего времени фирмой «Поляроид», основанной автором изобретения. В основе метода лежит процесс диффузионного переноса изображения (гл. 7). Схема строения фотоматериала, используемого в одноступенчатом способе получения цветного изображения, представлена на рис. 12.21. Поверхность негативной части фотоматериала имеет сложную мозаичную структуру из фотоэмulsionий, чувствительных к красной, зеленой и синей областям видимого спектра.<sup>11</sup> Applied Infrared Photography, Rochester, N. Y.: Eastman Kodak Company, 1980.

Рис. 12.21.

Схема строения фотоматериала Pclacolor.



Его главное отличие от обычного цветного фотоматериала состоит в том, что каждый из указанных слоев разделен на два подслоя — верхний светочувствительный (содержащий галогенид серебра) и нижний, окрашенный в дополнительный к верхнему подслою цвет. В качестве красителей используют специальные органические соединения, которые при их «активации» щелочью приобретают склонность к диффузии и, таким образом, могут проникать в соответствующий верхний подслой. В то же время

из слоя в слой эти красители не диффундируют благодаря специальным изолирующими прослойкам. Поскольку цветное проявление может протекать только в присутствии щелочи, в слоях негатива имеются мелкие капсулы со щелочной пастой.

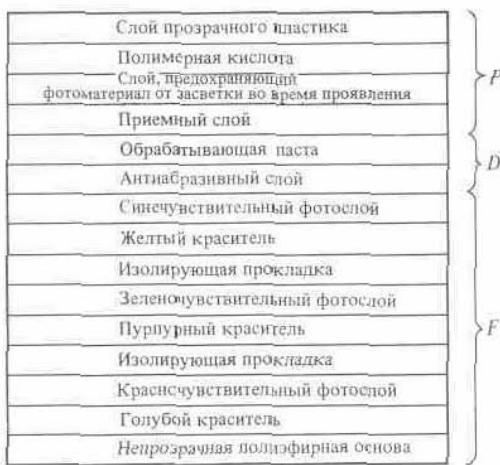
В состав цветного одноступенного фотоматериала кроме негатива входит бумага со специальным приемным слоем (рис. 12.21) и капсулы с обрабатывающей пастой, которые помещены между бумагой и негативом. После экспонирования и протягивания фотоматериала между валиками фотоаппарата капсулы разрушаются и обрабатывающая паста равномерно распределяется между приемным слоем бумаги и негативом (рис. 7.14). Одновременно разрушаются капсулы со щелочью и начинается процесс проявления. При этом на участках, подвергнутых воздействию света, восстанавливается металлическое серебро, а краситель теряет способность диффундировать, причем количество этого красителя пропорционально количеству металлического серебра.

Оставшийся диффундирующий краситель переходит на приемный слой, образуя позитивное цветное изображение. Для прерывания процесса проявления в приемном слое имеется кислота, которая нейтрализует щелочь красителя. После отделения негативной части от фотобумаги на ней образуется цветное позитивное изображение.

На этом же принципе одноступенного процесса разработан метод Kodak Ektaflex, позволяющий получать увеличенные цветные изображения. Метод «Полаколор» до сих пор широко применяется для получения цветных идентификационных фотографий для удостоверений. Причем после фотосъемки специальным фотоаппаратом на удостоверении печатается необходимая текстовая информация и через несколько минут после съемки аппарат выдает пластиковое удостоверение с цветной фотокарточкой и всеми данными.

Рис. 12.22.

Схема строения фотоматериала Polaroid SX-70.



В 70-х годах был разработан новый метод получения мгновенного цветного изображения, основанный на том же принципе диффузионного переноса. Этот процесс осуществляется на специальном фотоматериале Polaroid SX-70, который содержит более 14 слоев.

Фотоматериал представляет собой сложное сочетание негативной пленки и приемной бумаги, неразъемно объединенных в одном фотокомплекте. Структура такого фотоматериала представлена на рис. 12.22. Отметим, что совокупность слоев, обозначенная буквой F, представляет собой негативную часть материала и по своему строению полностью повторяет негативную часть пленки «Полаколор» (рис. 12.21).

Слои, обозначенные буквой D, содержат

проявляющие реагенты. Кроме того, специальные вещества, принимающие участие в процессе проявления, находятся в слоях, обозначенных буквой P. После завершения процесса в этих слоях создается цветное позитивное изображение.

Совокупности слоев P и D остаются прозрачными и не препятствуют экспонированию негативной части фотоматериала F. Процесс создания изображения в негативной части и перенос его на принимающий слой P протекают практически по тому же механизму, что и в случае метода «Полаколор».

Различие методов Polaroid SX-70 и «Полаколор» заключается в том, что в обрабатывающую жидкость, содержащую гидроксид калия (КОН) и диоксид титана, добавлены специальные непрозрачные красители, защищающие негативную часть материала от засветки в течение проявления. Аналогично методу «Полаколор» после экспонирования и протягивания снимка между валиками фотоаппарата капсула разрушается и обрабатывающая жидкость вместе с непрозрачными красителями разливается внутри фотоматериала между приемным и защищающим от фрикционных повреждений слоями.

Красители негативной части материала содержат метилфенилгидрохинон (МФГ), который, будучи растворенным в щелочи, делает эти красители способными диффундировать к приемному слою.

МФГ восстанавливает экспонированный галогенид серебра до металлического серебра при одновременном окислении красителя. В результате краситель утрачивает способность к диффузии,

а неокисленный краситель диффундирует к приемному слою, где и формируется цветное позитивное изображение. Одновременно с этим процессом происходит диффузия из негативного слоя в приемный ионов калия и гидроксила (получаются из KOH). Полимерная кислота, содержащаяся в приемном слое, нейтрализует ионы гидроксила и связывает ионы калия, в результате чего непрозрачные красители начинают приобретать прозрачность и изображение, сформированное в приемном слое, становится видимым. Одновременно происходит фиксирование изображения. Изображение рассматривается с той же стороны, с которой производилось экспонирование фотоматериала.

Поскольку в обычных фотоаппаратах происходит обращение изображения слева направо, которое не может быть устранено в процессе диффузационного переноса, в фотоаппаратах системы «Поляроид» используется дополнительное зеркало для обращения изображения. Для читателей, интересующихся этим процессом, рекомендуем работу его изобретателя Э. Ленда<sup>1</sup>), в которой подробно описан механизм процесса. В последнее время этот процесс приобрел огромную популярность у фотографов-любителей благодаря удобству и простоте. Сразу же после нажатия спусковой кнопки фотоаппарата из него выскакивает будущий снимок размером 9x9 см, который за несколько минут полностью проявляется прямо на глазах даже при самом ярком дневном освещении. Осуществилась давняя мечта многих фотографов-любителей получать практически мгновенно полностью готовый и не требующий дальнейшей обработки цветной отпечаток. Однако следует отметить, что качество получаемого изображения хуже, чем у снимка, изготовленного методом «Полаколор», и тем более, чем у снимка, полученного методом обычной цветной фотографии. Кроме того, процесс Polaroid SX-70 намного более дорогостоящий, чем обычная цветная фотография того же формата, требует специальных фотоаппаратов и не позволяет получать копий с оригинала. Еще одним недостатком метода является небольшой срок сохранности полученных снимков.

Метод Kodak Instant Color, разработанный фирмой Kodak (пленка выпускается фирмой с 1976 г.), основан на процессе получения мгновенного цветного изображения, отличном от метода Polaroid SX-70. Схема строения материала Kodak Instant Color показана на рис. 12.23. Буквы *P* и *F* обозначают слои фотоматериала, в которых формируются конечное и негативное изображения, а *D* — проявляющие слои.

Ч Land E. H. Absolute One Step Photography, Photographic Journal, 114, 1974, p. 338ff.

**Рис. 12.23.**

Схема строения фотоматериала Kodak Instant Color.

|   |
|---|
| Слой прозрачного пластика   |
| Приемный слой   |
| Белый светоотражающий слой  |
| Черный непрозрачный слой  |
| Голубой краситель   |
| Красночувствительный слой   |
| Слой, нейтрализующий окисленный проявитель                        |
| Пурпурный краситель   |
| Зеленочувствительный слой   |
| Слой, нейтрализующий окисленный проявитель                        |
| Желтый краситель  |
| Синечувствительный слой   |
| Слой, поглощающий ультрафиолетовое излучение                      |
| Обрабатывающая паста  |
| Слой, предохраняющий фотоматериал от засветки во время проявления |
| Кислотный слой  |
| Пластиковая основа  |

} *P*  
} *F*  
} *D*

В этом методе фотоматериал экспонируется снизу, а изображение проявляется в верхних слоях. Структура негативной части *F* аналогична соответствующей части фотоматериала Polaroid SX-70. Так как экспонирование фотоматериала Kodak осуществляется снизу, а фотоматериала «Поляроид» — сверху, используется обратный порядок слоев.

Экспонирование фотоматериала Kodak осуществляется аналогично методу Polaroid. Все слои, лежащие перед каждым регистрирующим слоем, прозрачны для излучений с длинами волн, поглощаемых этим слоем.

В фотоматериал введен слой, поглощающий ультрафиолетовое излучение, для устранения его влияния на изображение. После экспонирования и протягивания между валиками фотоаппарата

обрабатывающая жидкость распределяется между слоем, поглощающим ультрафиолетовое излучение, и слоем, непрозрачным в течение проявления. Проявитель, содержащийся в обрабатывающей жидкости, восстанавливает экспонированный галогенид серебра. Окисленный проявитель проникает в слой красителя и делает часть красителя диффундирующими. Этот краситель переходит в приемный слой, фиксируется и формирует цветное изображение. Количество красителя, ставшего диффундирующим, пропорционально количеству окисленного проявителя. В фотоматериал включены специальные, поглощающие окисленный проявитель, слои, предотвращающие проникновение окисленного проявителя в следующий слой с красителем. Аналогично фотоматериалу Polaroid SX-70 в этом материале также есть слои, непрозрачные в

течение проявления и предупреждающие засветку фотоматериала после экспонирования. Отпечаток рассматривается сверху, на фоне светоотражающего слоя белого цвета. Черный непрозрачный слой, расположенный под белым отражающим слоем (рис. 12.23), служит для предохранения фотоматериала от засветки и от попадания проявляющей жидкости в его верхние слои. Поскольку экспонирование происходит снизу, а рассматривание снимка — с противоположной стороны, обворачивающее зеркало не требуется. Все недостатки метода Polaroid SX-70, о которых подробно шла речь выше, свойственны и методу Kodak.

Фирма «Поляроид» недавно сообщила о разработке цветного одноступенного процесса на 35-мм пленке, названного Polachrome. Этот аддитивный процесс основан на ранее разработанном фирмой одноступенчатом цветном фотоматериале для киносъемки, названном «Полавижин». Система Polachrome разработана специально для фотожурналистов, которые могут пойти на снижение качества изображения ради ускорения передачи информации газетам и телевидению.

### Упражнения

1. Нарисуйте схему строения цветной обращаемой фотопленки. Укажите эффективную светочувствительность каждого слоя и цвета красителей после процесса обработки пленки.
2. Какую роль в цветных фотопленках играет слой коллоидного серебра? Объясните, почему этот слой отсутствует в цветных фотобумагах.
3. Сравните спектральные чувствительности глаза и профессиональной фотопленки Kodak 64.
4. Для чего используются краскообразующие компоненты? Каким образом эти компоненты вводятся в цветные фотоматериалы?
5. Пусть в условиях примера 12.1 применяется фотопленка Kodachrome 64. Укажите, каким будет диапазон плотностей при оптимальной экспозиции, а также при увеличении и уменьшении экспозиции на одну ступень.
6. В чем отличие профессиональных фотопленок и фотопленок общего назначения?
7. Чем различаются процессы обработки Kodachrome и Ektachrome?
8. Расскажите о маскировании. С какой целью оно используется в негативных фотоматериалах? Почему маскирование не используется в цветных обращаемых пленках?
9. В чем отличие способов цветного проявления в обращаемом и негативном процессах?
10. Почему цветные фотопленки делают сбалансированными для определенных цветовых температур?
11. Сравните по светочувствительности цветные фотопленки для дневного света и типа В.
12. В какой степени обеспечена сохранность цветного изображения у различных фотоматериалов?
13. Расскажите о хромогенных черно-белых фотопленках.
14. Объясните способ предохранения от засветки одноступенчатой цветной фотопленки во время проявления.

## Глава 13. Светофильтры

Светофильтры широко используются в фотографии. В этой главе мы остановимся главным образом на применении светофильтров в черно-белой и цветной фотографии; но не будем касаться использования светофильтров в научной фотографии. Желающим получить более глубокие сведения о светофильтрах можно рекомендовать различную литературу, например «Справочник по оптике<sup>1</sup>» и каталоги, выпускаемые фирмами, специализирующимиися на изготовлении светофильтров<sup>2,3</sup>.

### Типы светофильтров

Вообще говоря, для получения светофильтра могут быть использованы физические принципы, лежащие в основе цвето-образования тел и подробно изложенные в гл. 11. Абсорбционные светофильтры изготавливают из стекла, твердых неорганических материалов, органических красителей, тонких полупрозрачных металлических пленок, а также газов и жидкостей, помещаемых в специальные кюветы. В фотографии применяются светофильтры, использующие принцип интерференции. Неотражающие покрытия, основанные на этом принципе, улучшают оптические характеристики объективов (гл. 4). Дихроичные светофильтры для цветных фотоувеличителей часто представляют собой интерференционные светофильтры. Избирательное поглощение света может происходить при его отражении от металлических поверхностей (гл. 11). Например, золото поглощает свет с короткими длинами волн, что приводит к желтой окраске отраженного света.

Если под «фильтрованием» света подразумевать выделение определенной области из всего

спектра, то призму и дифракционную решетку можно считать светофильтрами (гл. 4). Для выделения нужного участка спектра можно воспользоваться явлением светорассеяния (гл. 11) наподобие того, как, например, при рассеянии солнечного света в атмосфере выделяется его синяя составляющая. *Поляризационные светофильтры*

!) Dnscoll W. G. (ed), Handbook of Optics, New York: McGraw-Hill, 1978,  
p. 8-1ff. <sup>2></sup> Pittaro E. M. (ed), Photo Lad Index, Hastings-on-Hudson, N. Y : Morgan  
and Morgan, Sect. 9. <sup>3)</sup> Kodak Filters for Scientific and Technical Uses, Rochester, N. Y : Eastman  
Kodak Co, 1978; Tiffen Photar Filter Glass Catalog, Hauppauge, N. Y.:  
Tiffen Manufacturing Corporation, 1978.

trys сконструированы так, что неполяризованный или частично поляризованный свет (гл. 4) при прохождении сквозь светофильтр становится плоскополяризованным. В этом случае действие светофильтра сводится к выделению из светового пучка составляющей с определенной пространственной ориентацией колебаний, а не с определенной длиной волны.

#### **Светофильтры в фотографии**

Наиболее широко в фотографии используются абсорбционные стеклянные светофильтры, а также фильтры с добавлением органических красителей и поляризационные светофильтры. Наиболее широкий выбор цветов обеспечивают пожалуй, желатиновые светофильтры (*фолии*), которые представляют собой тонкие слои окрашенной желатины. После нанесения на стеклянную подложку слой желатины отделяют от стекла и разрезают до соответствующих размеров. Затем полученные фолии закрепляют либо в специальных держателях, либо вклеивают между двумя стеклами. С оптической точки зрения первый вариант вполне приемлем, но в этом случае происходит значительное поверхностное отражение света, а также не исключены различные деформации светофильтра. Если же фолия монтируется между оптическими стеклами, имеющими просветляющее покрытие, то, по-видимому, этот вариант будет оптимальным как в отношении оптических свойств, так и по прочности. К основным преимуществам таких светофильтров следует отнести простоту их изготовления, в процессе которого основные характеристики — цветность и толщина — легко контролируются. Главный недостаток этих светофильтров — малая прочность и относительно высокие потери света, вызванные поверхностным отражением.

Различные типы желатиновых светофильтров выпускаются фирмой Eastman Kodak.

Повышенной прочностью обладают фильтры, изготовленные сложением двух стекол и склеиванием их окраенным связующим веществом. Фирма Tiff en изготавляет таким способом различные светофильтры, причем для склеивания используется вещество, коэффициент преломления которого совпадает с коэффициентом преломления стекла, что обеспечивает минимальные потери света на внутренних поверхностях стекол. Как правило, в этих светофильтрах не применяют противоотражающих покрытий; поэтому не устраняются потери света на поверхностях раздела воздух—стекло. По специальному заказу стеклянные светофильтры рассмотренного типа изготавливаются с просветляющим покрытием. Считается, что однородность цвета таких светофильтров примерно такая же, как у фолии. Однако следует отметить, что число типов таких светофильтров намного меньше, чем желатиновых.

Наиболее высокими эксплуатационными свойствами обладают стеклянные светофильтры, изготовленные из окраенного в массе стекла. Как правило, на них нанесено просветляющее покрытие, а лучшие из них имеют многослойное просветление. Основными преимуществами светофильтров этого типа являются уменьшенное поверхностное отражение и увеличенная прочность. С точки зрения цветовых характеристик (равномерности и разнообразия) стеклянные светофильтры уступают фолиям. Стеклянные светофильтры выпускаются в широком ассортименте фирмами Vivitar и Ноуа. Если оптические свойства не являются решающими, то можно использовать более дешевые пластмассовые светофильтры. Такие светофильтры преимущественно используются в фотоувеличителях для черно-белой и цветной печати. Лабораторные фильтры неактиничного освещения (защитные светофильтры) изготавливаются путем покрытия стекла окраенным органическим материалом, который в свою очередь покрывается защитным пластиком.

При падении естественного света на *дихроичный кристалл*, ориентированный определенным образом (рис. 13.1), свет, поляризованный в одной плоскости (гл. 4), поглощается, в то время как свет, поляризованный в перпендикулярной плоскости, проходит без изменений. Поляризационные светофильтры, широко используемые в цветной фотографии, изготавливаются диспергированием в пластике микрокристаллов органического дихроичного материала (хинониодосульфат). Пластик с микрокристаллами, ориентированными параллельно своим оптическим осям, вклеивается между двумя стеклами. В некоторых случаях эти светофильтры просветляются.

Обращаться со стеклянными светофильтрами следует так же аккуратно, как с объективами: избегать

касания оптических поверхностей, удалять пыль струей воздуха или мягкой кистью. Для очистки светофильтров можно использовать специальный очиститель для объективов или немного подышать на них, увлажняя поверхность, и затем осторожно протереть ее специальной тканью для объективов либо мягкой хлопчатобумажной или льняной тканью. Поскольку фолии очень хрупкие,

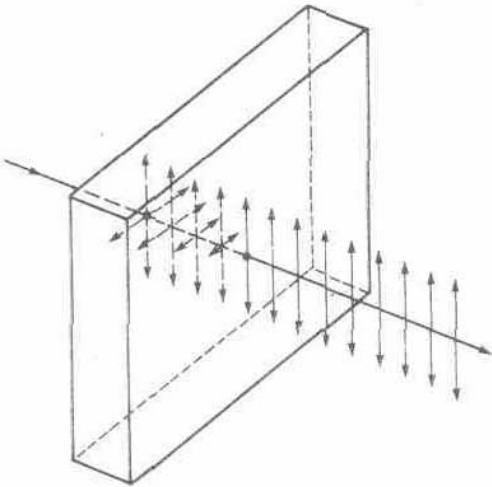


Рис. 13.1.

Поляризация света дихроичным веществом.

необходимо прикасаться только к их краям либо к оптическим поверхностям, защищенным мягкой тканью. Хранить их необходимо сухими, в специальных футлярах или альбомах, при температуре не выше 50°C. Фолии, вмонтированные между стеклами, менее хрупки, однако необходимо выдерживать такие же режимы хранения по температуре и влажности, так как они не полностью герметизированы. Пластиковые светофильтры обладают большей прочностью, чем фолии, однако и с ними нужно обращаться с осторожностью.

Если при фотосъемке используется светофильтр, то общее количество света, падающего на пленку, уменьшается. Для компенсации потери освещенности

необходимо увеличить выдержку и (или) относительное отверстие объектива. Ослабление света при использовании светофильтра может быть охарактеризовано с помощью *кратности светофильтра*, показывающей, во сколько раз ослабляется свет. Кратность светофильтра определяется для панхроматической фотопленки. Например, кратность светофильтра 2X означает, что экспозиция должна быть увеличена в два раза, чего можно достичь открытием диафрагмы на одну ступень или увеличением выдержки в два раза. В настоящее время общепринято определять коррекцию экспозиции в ступенях. Если экспозиция определяется с помощью встроенного в фотоаппарат экспонометра, измеряющего свет, прошедший через объектив и светофильтр, то в корректировке экспозиции нет необходимости, за исключением тех случаев, когда используются поляризационные светофильтры либо когда спектральная чувствительность экспонометра существенно неравномерна. В необычных случаях фотосъемки можно использовать отдельный экспонометр, держа его в руке и расположив перед ним используемый при съемке светофильтр.

При применении более чем одного светофильтра общая кратность будет равна произведению кратностей каждого из них, а общее число ступеней, на которое увеличивается экспозиция, равно сумме ступеней, соответствующих каждому светофильтру. Например, два светофильтра с кратностями 2x и 4x ослабляют свет в 8 раз (рис. 13.2); первый светофильтр ослабляет свет в два раза, а второй — в четыре раза. Следовательно, общее ослабление составляет  $(1/2) \cdot (1/4) = 1/8$ . Увеличение экспозиции для первого светофильтра составляет одну ступень и

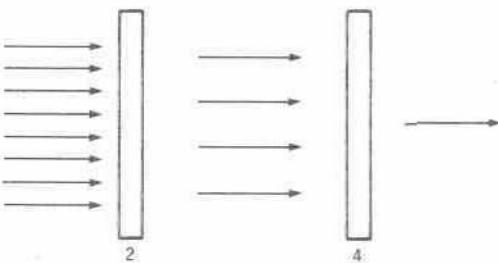


Рис. 13.2.

Ослабление света двумя светофильтрами

для второго — две ступени, а общее увеличение соответствует их сумме — трем ступеням.

Известно несколько различных систем маркировки светофильтров. Наиболее широко в США применяется система, предложенная фирмой Kodak для обозначения желатиновых светофильтров. Эта же

система используется фирмами Tiff en, Vivitar и Hooya. Фирма Harrison & Harrison применяет иную систему обозначений, хотя там, где это возможно, эта фирма указывает и эквивалентную общепринятую маркировку.

Было бы неправильно называть общепринятую числовую схему маркировки «системой», поскольку она не является достаточно последовательной. Некоторые расхождения в обозначениях светофильтров были устранены для некоторых первых светофильтров. Например, желтый светофильтр, наиболее часто используемый в черно-белой фотографии для притемнения голубого неба, обозначался K2. В настоящее время этот светофильтр обозначается № 8. Старые и новые обозначения для наиболее распространенных светофильтров приведены в табл. 13.1. Однако до сих пор в литературе встречаются старые обозначения светофильтров.

Таблица 13.1. Маркировка некоторых светофильтров

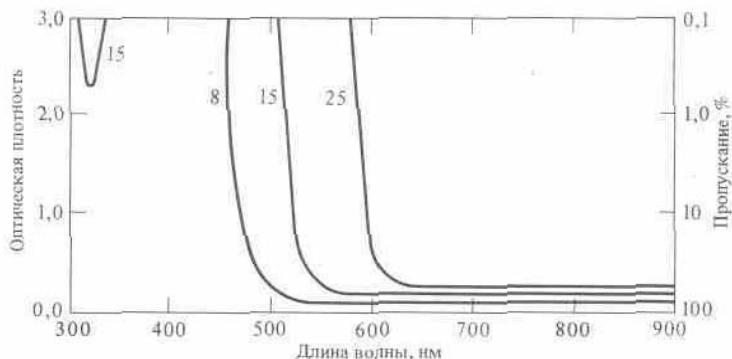
| Старое обозначение | Новое обозначение   | Цвет  |
|--------------------|---------------------|---|
| K1                 | № 6                 | Светло-желтый                                     |
| K2                 | № 8                 | Желтый  |
| K3                 | № 9                 | Интенсивно-желтый                                 |
| X1                 | № 11                | Желто-зеленый                                     |
| X2                 | № 13                | Темно-желто-зеленый                               |
| G A F C5           | № 15 № 25 № 29 № 47 | Желто-оранжевый<br>Красный Темно-красный<br>Синий |
| C4                 | № 49                | Темно-синий                                       |
| B                  | № 58                | Зеленый   |
| N                  | № 61                | Темно-зеленый                                     |

#### **Компенсационные светофильтры**

Большинство панхроматических черно-белых фотопленок обладает повышенной чувствительностью к ультрафиолетовому и синему излучению, и поэтому для компенсации этой излишней чувствительности используются так называемые *компенсационные светофильтры* — светофильтры желтого цвета различных оттенков. Это свойство черно-белых фотопленок может приводить к нежелательным эффектам, особенно при фотографировании пейзажей в ясный солнечный день, когда освещение насыщено синим и ультрафиолетовым светом. Если в этих условиях проводить fotosъемку без компенсационных светофильтров, то на снимке синее небо будет казаться «выбеленным» и в результате не получится адекватного контраста между синим небом и белыми облаками.

**Пример 13.1.** Для фотографирования сюжета вне помещения в яркий солнечный день воспользуемся черно-белой фотопленкой 125 ASA. Небо ярко-синее и обильно покрыто кучевыми облаками. Какие светофильтры и экспозиция требуются для того, чтобы небо на снимке было темнее облаков? Необходимо воспользоваться светофильтром, который поглощает свет в синей части спектра. Наиболее подходящими являются светофильтры №8 (K2), №15 (G) и №25 (A). Спектральные кривые пропускания этих светофильтров показаны на рис. 13.3. Светофильтром №25 следует пользоваться только в тех случаях, когда необходимо сильно притемнить синеву неба. Как правило, удовлетворительные результаты получаются при использовании светофильтра № 8, который не пропускает свет с длинами волн короче 480 нм (рис. 13.3), хотя в некоторых случаях можно применить и светофильтр № 15. Кратность светофильтра № 8 соответствует 2x. Для яркого солнечного дня оптимальные факторы экспозиции, определенные на основе среднестатистических данных (гл. 2), составляют 1:16 и 1/125 с. При установке светофильтра надо использовать следующие комбинации: 1:11 и 1/125 с или 1:16 и 1/60 с.

Светофильтры, применяемые для создания резкого («драматического») эффекта, иногда называют *сверхкомпенсационными светофильтрами*. Такой эффект будет иметь место в рассмотренном выше примере при использовании светофильтра № 25. Поскольку этот светофильтр не пропускает свет с длинами волн короче 580 нм (обладает красным цветом), свет в зеленой, синей и частично в желтой областях спектра будет поглощен (рис. 13.3). Кратность данного светофильтра равна 8 x, поэтому выбранную экспозицию необходимо увеличивать на три ступени. Фотоснимки, приведенные на рис. 13.4—13.6, показывают эффекты, создаваемые светофильтрами № 8 и № 25 при съемке сюжета, описанного в примере 13.1. Отметим возрастание контрастности между небом и облаками по мере



**Рис. 13.3.**  
Спектральные кривые пропускания светофильтров № 8, № 15 и № 25.

**Рис. 13.4.**  
Пейзаж сфотографированный на панхроматическую фотопленку (ЭНМ, 1983 г.)

уменьшения количества относительно коротковолнового излучения, достигающего пленки.

При рассмотрении в гл. 12 инфракрасных фотопленок была

отмечена необходимость применения соответствующих светофильтров. Инфракрасные фотопленки общего назначения имеют спектральную чувствительность, соответствующую видимой и частично инфракрасной областям спектра (приблизительно до 875 нм).

**Рис. 13.5.**  
Тот же пейзаж, снятый со светофильтром № 8 (ЭНМ, 1983 г.)

**Рис. 13.6.**  
Пейзаж, снятый со светофильтром № 25 (ЭНМ, 1983 г.).



Обычно с этими фотопленками используются соответствующие светофильтры для частичного поглощения света в видимой области спектра и, следовательно, усиления инфракрасной составляющей излучения. Если необходимо зарегистрировать и видимое излучение, с черно-белой инфракрасной фотопленкой можно использовать светофильтр № 15 (рис. 13.3), который прозрачен для зеленой, красной и инфракрасной областей спектра (но не для синей). Если же видимое излучение регистрировать не нужно, то следует применять светофильтр № 25, который не пропускает синего и большую часть зеленого света.

Существуют специальные инфракрасные светофильтры, которые поглощают весь или почти весь видимый свет.



Например, светофильтр № 89В пропускает около 10% света с длиной волны 700 нм и приблизительно 90% — 800 нм. Использование этого светофильтра с однообъективным зеркальным фотоаппаратом затруднено, поскольку большинство фотографов не в состоянии что-нибудь разглядеть сквозь него. Поэтому, до того как поместить светофильтр перед объективом фотокамеры, его необходимо сфокусировать на снимаемый объект. Экспозиция определяется на основании данных, указанных на упаковке пленки, и с учетом кратности светофильтра.

Так как фокусное расстояние объектива для инфракрасного света больше, чем для видимого, необходима коррекция фокусировки. Большинство шкал глубины резко изображаемого пространства современных объективов снабжено красной линией или точкой, иногда маркированной буквой R (рис. 5.19), которая указывает оптимальную наводку на резкость объектива при съемке в инфракрасном диапазоне. Вначале

изображение фокусируется обычным визуальным способом, а затем в полученное значение расстояния до предмета вводится поправка с учетом этой красной отметки. Более подробно вопросы инфракрасной фотографии изложены в работе<sup>1</sup>.

#### Контрастные светофильтры

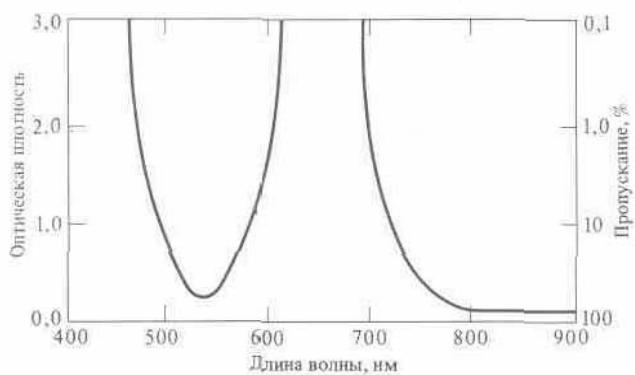
При фотосъемке цветных объектов на черно-белую панхроматическую фотопленку в некоторых случаях довольно трудно получить различимые по тону изображения предметов разного цвета, но с

одинаковыми коэффициентами отражения. Например, красные буквы на зеленом фоне, сфотографированные на панхроматическую фотопленку, весьма трудно различимы, особенно если красный и зеленый красители обладают одинаковыми коэффициентами отражения. Если же при fotosъемке использовать светофильтр № 58 с ограниченным пропусканием синего и красного света (рис. 13.7), то получается снимок, на котором имеются темные буквы на светлом фоне. Этот эффект объясняется тем, что красный свет, отраженный от букв, поглощается, а зеленый свет фона проходит сквозь светофильтр беспрепятственно. Если же используется светофильтр № 25, то снимок получается с обратным соотношением тонов (рис. 13.8). Такие светофильтры называются *контрастными*. Если же коэффициенты отражения поверхностей значительно отличаются друг от друга, то нет необходимости использовать контрастные светофильтры для получения высококонтрастного отпечатка.

**Светофильтры, ослабляющие воздействие атмосферной дымки**  
При пейзажной fotosъемке, особенно если часть сюжета находится далеко от фотоаппарата, очень часто приходится сталкиваться с мешающим влиянием дымки, приводящей к уменьшению резкости удаленных предметов. Возникновение



Рис. 13.7.



Спектральная кривая пропускания светофильтра № 58.  
!> Applied Infrared Photography, Rochester, N Y Eastman Kodak Company, 1980

Рис. 13.8.

Изменение контраста при съемке красных букв на зеленом фоне *a* — без фильтра, *b* — с зеленым фильтром (№ 58) *c* — с красным фильтром (№ 25) (ЭНМ, 1983 г.)

дымки объясняется тем же самым явлением, которое вызывает голубую окраску неба (гл. 12). Солнечный свет рассеивается молекулами воздуха, и так как интенсивность рассеяния изменяется

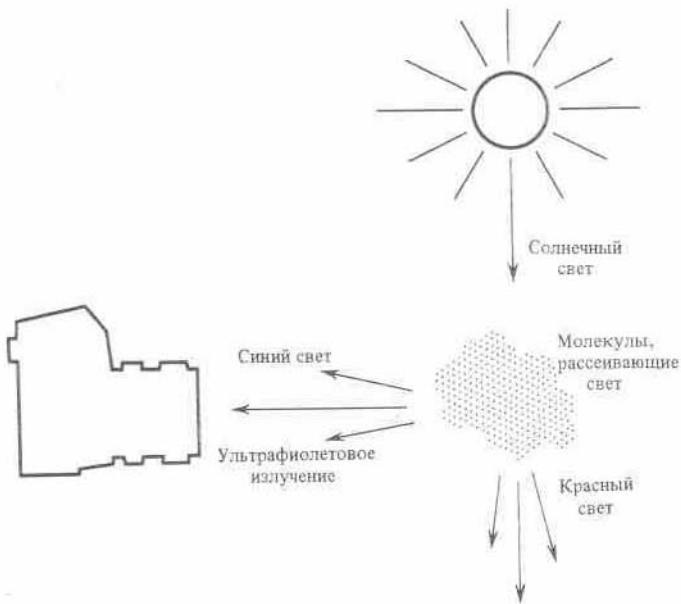


обратно пропорционально длине волны, свет с короткими длинами волн (синий и ультрафиолетовый) рассеивается сильнее, чем свет с большими длинами волн (красный) (рис. 13.9). *Светофильтры, ослабляющие воздействие атмосферной дымки* (например, светофильтр № 2A), практически не влияют на общую передачу сюжета, но уменьшают эффект дымки, поглощая весь ультрафиолетовый и частично синий свет (рис. 13.10). При этом тональные соотношения сюжета до некоторой степени изменяются, поскольку происходит частичное поглощение синего света. Если же по замыслу необходимо существенно уменьшить синюю составляющую света, то для дальнейшего уменьшения дымки можно использовать светофильтр № 8 или № 15. В ситуациях, когда проблема уменьшения дымки очень важна, можно воспользоваться светофильтром № 25, хотя

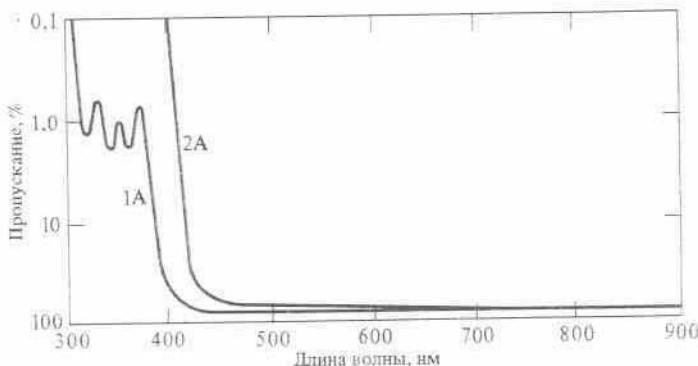
Рис. 13.9.

Образование дымки при рассеянии коротковолнового излучения атмосферой.





такой же поглощающей способностью синего и (или) ультрафиолетового света, поэтому их использование практически ничего не дает. Они часто служат для предохранения передней поверхности объективов, что может быть необходимым во время фотосъемки при неблагоприятных условиях, например, когда в объектив могут попадать брызги морской воды или песок.



неба. Однако использование этого светофильтра не всегда желательно, так как он обладает заметной розовой окраской и частично поглощает свет в синей части спектра (рис. 13.10). Светофильтр № 1А бывает полезен в некоторых случаях цветной фотосъемки на натуре, когда объект съемки освещен только светом синего неба.

#### Нейтрально-серые светофильтры

В некоторых ситуациях необходимо уменьшать освещенность фотопленки без изменения спектрального состава света. Для этой цели предназначены нейтрально-серые светофильтры, которые изготавливаются в виде фолий или стеклянных фильтров. Желатиновые светофильтры изготавливаются диспергированием коллоидного графита в желатине и предназначены для съемки в видимой области спектра. Они сильно поглощают излучение в ультрафиолетовой области спектра и лучше пропускают в инфракрасной области, чем в видимой. Фолии обладают неравномерной поглощающей способностью в видимой области спектра (рис. 13.11): они, как правило, поглощают приблизительно в два раза больше света при 400 нм, чем при 500 нм. Склейенные светофильтры, в которых краситель введен в склеивающее вещество, обладают более равномерной поглощающей способностью в видимой области спектра (рис. 13.11).

Нейтрально-серые светофильтры используются для уменьшения освещенности пленки в случае съемки объектов, яркости которых слишком велики даже при минимальном значении относительного отверстия объектива. Такая ситуация часто имеет место при фотографировании яркого источника света. Если яркость источника слишком велика для используемой фотопленки, то источник будет, вероятно, слишком ярок

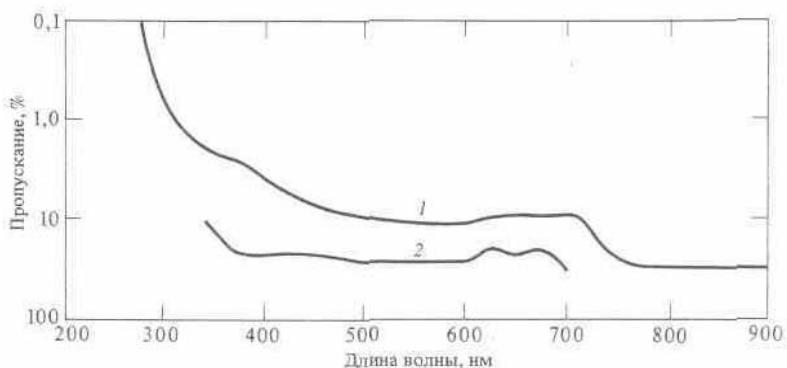
использование этого светофильтра приводит к значительному искажению соотношений тонов, поскольку светофильтр поглощает синий, зеленый и значительную часть желтого света.

В некоторых случаях используют светофильтры, прозрачные в видимой части спектра и называемые *ультрафиолетовыми светофильтрами*, в качестве светофильтров, устраняющих дымку, и (или) для поглощения ультрафиолетового света. Как правило, оптические стекла, из которых изготавливаются линзы объективов фотоаппаратов, обладают

Рис. 13.10.

Спектральные кривые пропускания светофильтров № 1А и № 2А.

Однако две дополнительные оптические поверхности, помещаемые между предметом и объективом, вызывают ухудшение качества изображения. Конечно, наилучшим способом защиты объектива от внешних повреждений является крышка объектива. Иногда для этой цели рекомендуют светофильтр № 1А, применяемый для коррекции цвета

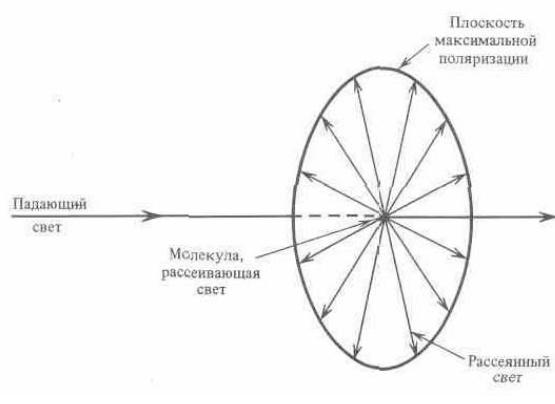


**Рис. 13.11.**

Спектральные кривые пропускания нейтрально-серого желатинового светофильтра (кривая 1) с оптической плотностью 1 и задерживающего светофильтра (кривая 2) с оптической плотностью 0,6 и для наблюдения незащищенным глазом, так что требуется использование серого светофильтра. В некоторых

фотографических ситуациях желательно уменьшать глубину резко изображаемого пространства путем увеличения действующего отверстия диафрагмы. В этом случае можно уменьшить освещенность фотопленки, используя нейтрально-серый светофильтр. Иногда при съемке движущегося объекта необходимо использовать длительную выдержку, позволяющую получить смазанность контуров изображения; для этого также может быть использован нейтрально-серый светофильтр, снижающий освещенность изображения. Отметим, что зеркальные объективы (как правило, длиннофокусные) представляют собой такие оптические системы, конструкция которых не позволяет использовать диафрагмирование для регулирования светового потока. Вместе с такими объективами также приходится использовать нейтрально-серые светофильтры для снижения освещенности изображения.

### Поляризационные светофильтры



В гл. 11 были обсуждены вопросы рассеяния света в атмосфере, в результате которого рассеянный свет становится частично поляризованным. Свет, рассеянный в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения (рис. 13.12), поляризован в наибольшей степени, в то время как свет, рассеянный вдоль направления распространения, поляризован незначительно. Так как солнце является источником освещения атмосферы, свет, рассеянный небом, поляризуется в наибольшей степени в направлениях, перпендикулярных

линии, соединяющей солнце с рассеивающей молекулой. Например, если солнце находится в восточной части небосвода, то свет, рассеиваемый в северном и южном направлениях, наиболее поляризован. Свет, рассеиваемый в западном направлении, поляризован незначительно. Аналогично, когда солнце находится в зените, дымка вызывается сильно поляризованным светом, возника-

**Рис. 13.12.**

Рассеяние света молекулой воздуха с образованием плоскости максимальной поляризации.

**Рис. 13.13.**

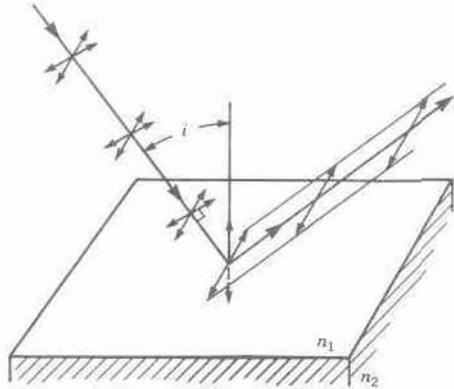
Рассеяние света молекулами воздуха в случае когда солнце находится в зените

ющим при рассеянии солнечного света на молекулах атмосферного воздуха вблизи поверхности земли (рис. 13.13).

Свет частично поляризуется при отражении от поверхности диэлектрика. Степень поляризации зависит от коэффициента преломления материала (гл. 4) и угла падения света. Плоскость минимальной поляризации света перпендикулярна отражающей поверхности и проходит через падающий луч, а плоскость максимальной поляризации перпендикулярна этой плоскости (рис.

13.14). Отраженный свет будет полностью поляризован (плоскополяризованный свет), если угол

падения  $i$  таков, что  $\operatorname{tg} z = /i_2/$  (13.1)



**Рис. 13.14.**

Поляризация света при его отражении от неметаллической поверхности.

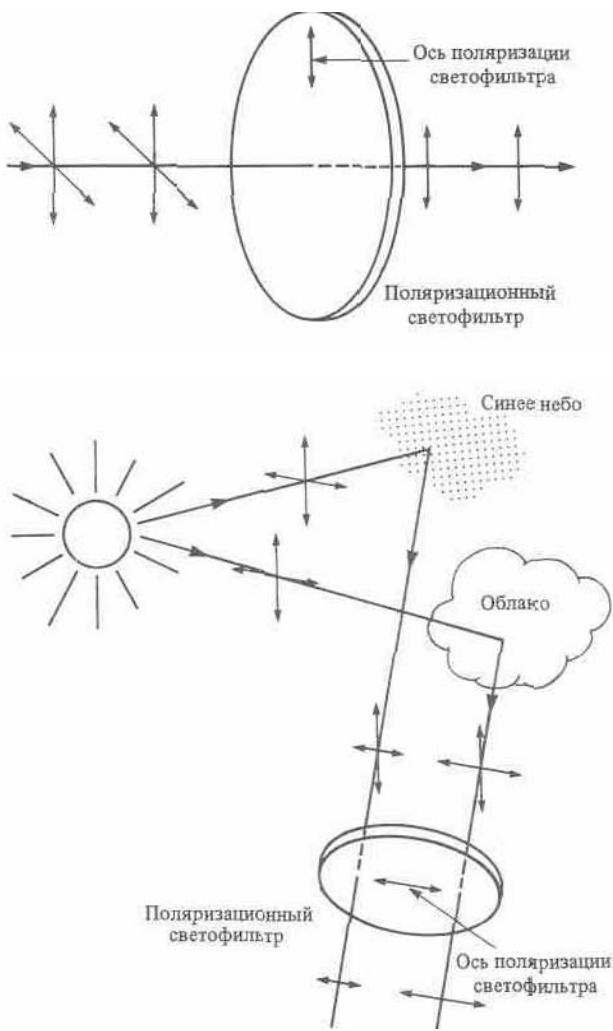
где  $n_1$  и  $n_2$  — коэффициенты преломления двух сред. Этот угол называется углом полной поляризации или углом Брюстера, а выражение (13.1) — законом Брюстера. Если угол падения светового луча равен нулю, то отраженный свет неполяризован. Поляризацию света при отражении вызывают как прозрачные, так и непрозрачные диэлектрики. Для хороших проводников (таких, например, как металлы) этот эффект минимален.

Возникающие в фотографии проблемы, вызванные

рассеянием света атмосферой, уже рассматривались. Отражение света от поверхностей предметов приводит к образованию бликов, которые часто бывают нежелательными. Если рассеянный или отраженный свет частично или полностью поляризован, то для ослабления возникающих бликов можно воспользоваться поляризационным светофильтром. Поляризационный светофильтр или, как обычно говорят, поляроид, поглощает большую часть света, направление колебания которого перпендикулярно оси поляризации светофильтра (рис. 13.15). Как правило, поглощается также около 40% света, поляризованного параллельно оси поляризации светофильтра. Если бы отраженный свет поглощался полностью, то оптическая плотность светофильтра была бы слишком большой для большинства случаев применения. Здесь предполагается, что свет поляризован в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (перпендикулярно и параллельно оси поляризации светофильтра), поскольку свет с произвольной ориентацией плоскости поляризации всегда может быть представлен как свет, поляризованный в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (гл. 4).

Для определения степени поляризации отраженного от снимаемого объекта света можно использовать этот же поляроид. Та часть сюжета, которая является источником частично поляризованного света, будет казаться относительно более темной.

Например, при съемке в северном направлении в ясный день северного пейзажа, освещенного солнцем, которое расположено в восточной части небосвода при наличии значительной кучевой облачности, для притемнения неба можно эффективно применить поляроид. В результате контраст изображения неба и облаков значительно увеличивается (рис. 13.16). Такой эффект объясняется тем, что, как уже говорилось, свет от голубого неба частично поляризован, а свет, отраженный облаками,



**Рис. 13.15.**

Поляризация света с помощью поляризационного светофильтра

**Рис. 13.16.**

Эффект притемнения синего неба относительно облаков при использовании поляризационного светофильтра.

неполяризован. Яркостные соотношения для остальных участков пейзажа будут оставаться практически неизменными. Яркость облаков при этом будет также снижена, но в меньшей степени, чем яркость окружающего неба.

**Пример 13.2.** Предположим, вы хотите сфотографировать фрукты, лежащие на столе, покрытом стеклом. Свет от окна, расположенного напротив фотоаппарата, отражаясь от стеклянной поверхности, вызывает нежелательные блики (рис. 13.17). Как применить поляризационный светофильтр для ослабления отражения?

Образующиеся блики в этом случае можно почти полностью исключить. Для этого необходимо вначале расположить фотоаппарат под углом Брюстера (угол  $\gamma$  на рис. 13.17), а затем

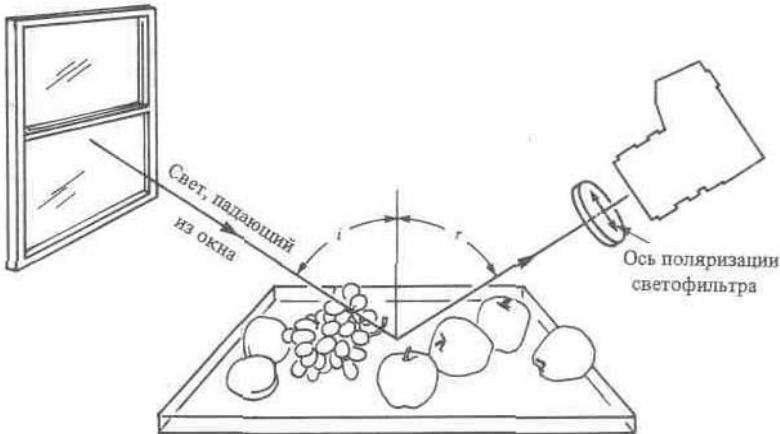


Рис. 13.17.

Ослабление бликов с помощью поляризационного светофильтра. Установить светофильтр так, чтобы его ось поляризации была вертикальна относительно стола. В фотоаппарат будет попадать только свет, который падает на поверхность стола под углом Брюстера и является, как уже отмечалось, плоскополяризованным (рис. 13.14). Установливая ось

светофильтра перпендикулярно плоскости поляризации, можно добиться ослабления бликов. Коэффициент преломления стекла составляет около 1,5; следовательно, из равенства (13.1) получим  $\text{tg } \beta = 1,5/1$ , откуда угол  $\beta$  приблизительно равен  $56^\circ$ . Удобнее этот угол измерять относительно стола, и тогда он равен  $34^\circ$ . При освещении стола только естественным (неполяризованным) светом необходимо увеличить экспозицию приблизительно на две ступени, поскольку светофильтр поглощает фактически весь свет, поляризованный перпендикулярно оси поляризации светофильтра, и приблизительно половину горизонтально поляризованного света. При необходимости можно воспользоваться экспонометром, замеряя свет, прошедший через поляризационный светофильтр.

В некоторых случаях нельзя полностью избавиться от бликов, особенно для искривленных поверхностей. В условиях студийной съемки, когда можно контролировать условия освещения, от бликов можно полностью избавиться, устанавливая поляризационные светофильтры как перед осветительными приборами, так и перед объективом фотоаппарата. Фильтры, используемые с осветительными приборами, могут не обладать такими же оптическими качествами, как фильтры, надеваемые на объектив фотоаппарата, и обычно представляют собой листы пластика или стекла со специальным покрытием.

Иногда рекомендуют применять пару поляризационных светофильтров в качестве *нейтрально-серых светофильтров переменной плотности*. Из первого светофильтра выходит поляризованный свет, интенсивность которого регулируется относительным положением второго светофильтра. Для естественного света минимальное уменьшение интенсивности составляет приблизительно две ступени (оптическая плотность около 0,6), а максимальное уменьшение — приблизительно пять ступеней (оптическая плотность около 1,5). При использовании такой комбинации светофильтров для определения соответствующей экспозиции необходимо пользоваться экспонометром.

Применяя два поляризационных светофильтра, надо проявлять осмотрительность, особенно когда оси поляризации светофильтров ориентированы взаимно перпендикулярно. В этом случае проходящий свет имеет синюю окраску; другими словами, это устройство не является действительно нейтральным фильтром, хотя обычные поляризационные светофильтры имеют не намного более высокое пропускание в синей области спектра (33%), чем в красной (28%). Неравномерность спектральной характеристики поляризационного светофильтра не объясняет описанное выше явление, поскольку светофильтры, оси которых ориентированы параллельно, не кажутся синими.

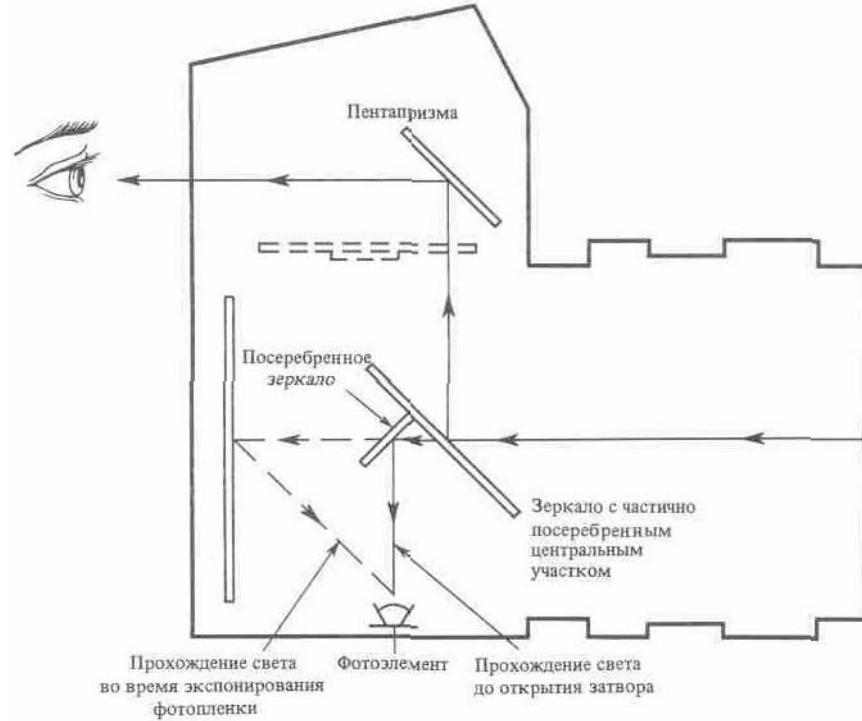
В большинстве однообъективных зеркальных фотоаппаратов переднее зеркало, изготовленное, как правило, из алюминия, используется для отражения изображения на пентапризму. Поляризованный свет при отражении от такого зеркала будет настолько незначительно менять свою поляризацию, что

этим эффектом можно пренебречь. Если поляроид помещен перед фотоаппаратом, освещаемым естественным светом, то в окуляре видоискателя не будет наблюдаться никаких изменений яркости при вращении этого поляроида. Если фотоаппарат снабжен встроенным экспонометром, фотоэлемент которого измеряет яркость света, отраженного зеркалом, то при вращении поляроида показания экспонометра также не изменяются. Такая ситуация наблюдается для большинства фотоаппаратов, поскольку обычно фотоэлементы расположены снизу пента-призмы. Хороший источник неполяризованного света для подобного испытания — свет, отраженный плоской окрашенной матовой поверхностью, освещенной диффузным источником света. С помощью поляроида можно проверить, является ли отраженный этой поверхностью свет поляризованным или нет.

С появлением метода замера экспозиции в плоскости фотопленки автоматических фотоаппаратов проблема возможной поляризации света становится более серьезной. Чтобы сделать замер до открытия затвора, необходимо либо вмонтировать в фотоаппарат две системы светочувствительных датчиков, либо использовать полупрозрачное зеркало, пройдя которое, часть света попадает на светочувствительный элемент, расположенный в фотоаппарате (рис. 13.18). В некоторых фотоаппаратах с этой целью используются зеркала, центральная часть которых полупрозрачна и пропускает около 10% падающего света. Остальная часть зеркала непрозрачная и отражает весь свет. В других типах фотоаппаратов серебряное зеркало имеет множество небольших прозрачных участков, которые все вместе пропускают около 10% падающего света. В каждом из этих типов фотоаппаратов свет, отраженный от непосеребренных или полупосеребренных участков, является частично поляризованным. Следовательно, проходящий на фотоэлемент свет также будет частично поляризован. Если с фотоаппаратом, в котором применено частично металлизированное зеркало, используется поляризационный светофильтр и если падающий свет не поляризован, то наблюдается изменение показаний экспонометра при изменении ориентации фильтра. Если же затем воспользоваться фотоаппаратом, зеркало которого имеет прозрачные участки, то никаких изменений в показаниях не наблюдается. Кроме того, в первом случае видно некоторое изменение яркости изображения, а во втором — нет. Изменения в показаниях экспонометра составляют по меньшей мере пол ступени, а изменения яркости кажутся приблизительно такими же. Нетрудно понять, почему

Рис. 13.18.

Схема измерения света в плоскости фотопленки встроенным в фотоаппарат экспонометром.



в первом случае показания экспонометра меняются, а во втором — нет. Однако объяснить наблюдаемые эффекты значительно сложнее. Из сказанного следует, что фотоаппарат с встроенным экспонометром, показания которого зависят от поляризации света, следует применять с осторожностью при определении уровня поляризованного света от ясного неба или света, отраженного неметаллическими поверхностями. Если с фотоаппаратом используется обычный поляризационный

светофильтр, а встроенный экспонометр дает зависящие от поляризации показания, проблема определения правильной экспозиции будет усложняться при определении показаний экспонометра до экспонирования пленки. Отметим, что если поляризационный светофильтр отсутствует, проверку можно осуществить измерением поляризованного света, отраженного от плоской неметаллической поверхности. Если на показания экспонометра не влияет поляризация света, то при вращении фотоаппарата вокруг оси объектива показания экспонометра не должны меняться. Некоторым точечным экспонометрам (спотметрам) также свойственна зависимость показаний от

поляризации, что объясняется использованием в их конструкции частично металлизированных зеркал, которые разделяют пучок света почти так же, как в однообъективных зеркальных фотоаппаратах. Поэтому при использовании этих экспонометров следует прибегать к тем же мерам предосторожности, что и в случае упомянутых выше однообъективных зеркальных фотоаппаратов. Более

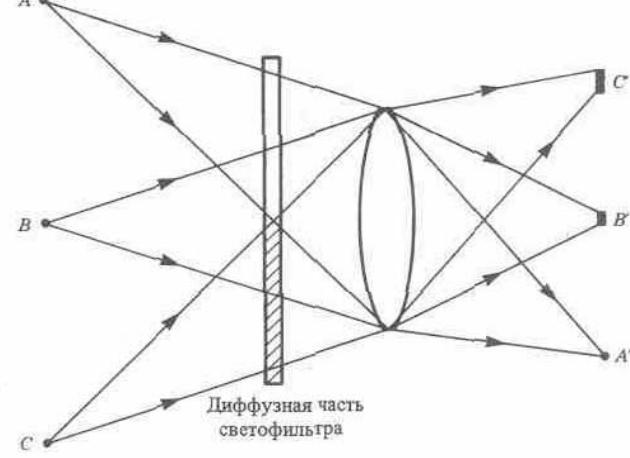
подробно проблемы поляризации света рассмотрены в работе Моргана<sup>1</sup>).

### Светофильтры для специальных эффектов

Светофильтры, предназначенные для видоизменения обычного изображения и формирования необычных изображений на фотопленке, называются *светофильтрами для специальных эффектов*. Некоторые из них не светофильтры в обычном понимании, а специальные линзы. К светофильтрам, создающим особые эффекты, относятся такие, которые формируют в изображении «звезды», создают многократность и многоцветность изображений, эффект дымки и многие другие эффекты. Рассмотрим только некоторые из этих светофильтров, с тем чтобы понять основополагающие принципы их конструкций.

Один из типов светофильтров для специальных эффектов изменяет только часть изображения, оставляя остальную часть неизменной. К нему относятся светофильтры, которые создают эффект «мягкого фокуса» у части изображения. Все эти светофильтры не являются плоскими. Например, светофильтр, который создает эффект «размытия» половины изображения, а другую половину оставляет резкой, представляет собой светофильтр, одна половина оптической поверхности которого рассеивает свет, а другая не оказывает на него влияния. С первого взгляда такое суждение кажется правильным. Вспомним, однако, гл. 4, где было сказано, что в формировании изображения объекта участвует вся линза. Если это действительно так, то светофильтр скорее должен немного размывать всю картину, чем только одну из ее половин. Действие светофильтра объясняется тем, что он располагается перед объективом, а не в его плоскости (рис. 13.19).

Отметим, что лучи, формирующие изоб-



являются полностью рассеянными, и, значит, изображение  $C'$  обладает наибольшей мягкостью. Так как свет от некоторых точек, расположенных вблизи  $A$ , может быть рассеян в точку  $A'$ , ее резкость при этом может быть несколько уменьшена. Действие большинства светофильтров такого типа в некотором отношении основано на этом принципе.

Если бы вся поверхность светофильтра была диффузной, то все изображение выглядело бы мягким. Такие диффузные светофильтры помещаются перед объективом для создания эффекта мягкого оптического рисунка и обычно используются в портретном жанре для «оптической ретуши» морщин и заметных дефектов кожи лица. Аналогичный эффект достигается использованием специальных портретных, мягкорисующих объективов. В любом случае все изображение получается со смягченным оптическим рисунком. Диффузность поверхности светофильтра достигается путем нанесения на стеклянную пластинку концентрических тонких линий травлением или гравировкой либо путем обработки поверхности до матового состояния. Если точечный источник света или любой отраженный световой блик фотографируется через проволочный экран-решетку в виде сетки, то на изображении возникают световые лучи, расходящиеся от источника света (рис. 13.20). В этом случае на ярких участках световые лучи приводят к «растягива-

Рис. 13.19.

Формирование оптического изображения на пленке в случае использования светофильтра, половина которого рассеивает свет

1) Morgan, Introduction to Geometrical and Physical Optics, N.Y., McGraw-Hill, 1953, p 353ff, p 331ff.  
ражение  $A'$  точки  $A$ , не проходят через диффузную (рассеивающую свет) часть светофильтра и, следовательно, изображение  $A'$  является резким. Часть лучей, формирующих изображение  $B'$  точки  $B$  являются рассеянными, а часть — нет. Следовательно, изображение  $B'$  будет обладать мягкими очертаниями.

Все лучи, исходящие из точки  $C$ ,

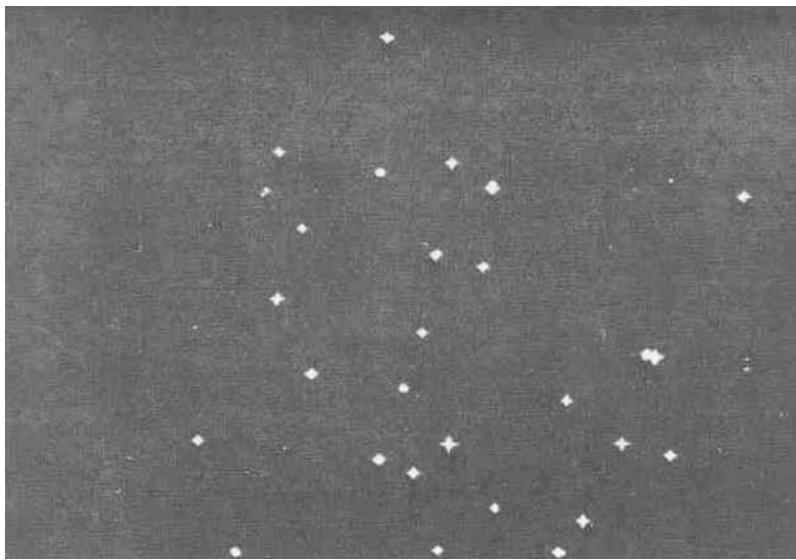


Рис. 13.20.  
«Звездный» эффект при съемке новогодней елки через экран-решеткунию» бликов в горизонтальном и вертикальном направлениях, отражаясь от проволок экрана. Световые лучи в остальной части изображения испытывают точно такое же влияние, но, поскольку эти лучи очень слабые, никакого эффекта не наблюдается. Действующие аналогично «звездные» светофильтры изготавливаются вытравливанием или нанесением прямых линий на поверхность светофильтра и позволяют получить такой же

эффект, как в случае проволочного экрана.

#### Светофильтры для цветной фотографии

Некоторые светофильтры, применяемые в черно-белой фотографии, могут использоваться и в цветной фотографии. Большинство светофильтров с правильной передачей тонов и контрастных светофильтров нельзя использовать в обычной цветной фотографии, поскольку они поглощают значительную часть света в видимой области спектра. Например, желтый светофильтр № 8 поглощает всю синюю часть спектра, и в результате на снимке синий цвет переходит в черный. Такое притемнение может быть желательным на черно-белом изображении, но неприемлемо для большинства цветных фотографий. Исключение — использование желтого светофильтра вместе с инфракрасной цветной фотопленкой (гл. 12). Вспомним, что инфракрасная цветная пленка иногда называется пленкой с условным цветовоспроизведением, и, поскольку она чувствительна к зеленому, красному и инфракрасному свету, а к синему — нет, вместе с ней необходимо использовать желтый светофильтр. Обычно рекомендуется применять светофильтр № 12, хотя в некоторых случаях можно использовать светофильтры № 8 и № 15. Светофильтр для устранения или ослабления атмосферной дымки не применяется вместе с цветными пленками, хотя светофильтр № 1A, используемый для коррекции цвета неба, иногда используется в цветной фотографии для ослабления голубого оттенка предметов, освещенных открытым небом.

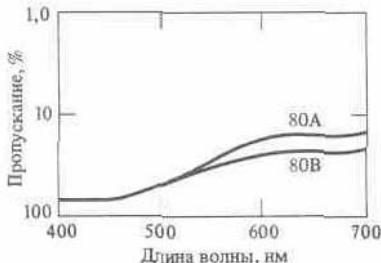
Поляризационные и нейтрально-серые светофильтры могут применяться с одинаковым успехом и в цветной, и в черно-белой фотографии. Так как светофильтры для устранения атмосферной дымки и светофильтры с правильной передачей тонов не применяются в цветной фотографии для устранения «эффектов, возникающих при рассеянии света в атмосфере, следует пользоваться поляризационными светофильтрами.

#### Конверсионные и коррекционные светофильтры

В гл. 12 были рассмотрены фотопленки с различными спектральными характеристиками, предназначенные для съемки при дневном освещении или при свете ламп накаливания. Иногда с целью экономии или удобства используют фотопленку, сбалансированную для дневного освещения, для съемки при свете ламп накаливания либо наоборот, и при этом получают нормальный цветовой баланс. Делать это позволяют *конверсионные светофильтры*. Синие светофильтры, используемые с фотопленками для дневного света при освещении лампами накаливания, обозначаются № 80A, № 80B, № 80C и № 80D. Эти светофильтры обладают широкой полосой пропускания, а в синей области спектра пропускают практически 100% света (рис. 13.21).

Рис. 13.21.

Спектральные кривые пропускания светофильтров № 80A и № 80B



Они служат для увеличения цветовой температуры источника света до значений, на которые рассчитана пленка. Вспомним, что если при съемке на фотопленку для дневного света в качестве источников света используются лампы накаливания, то в результате получается снимок с более интенсивной желтой окраской. Этот недостаток можно скорректировать, если перед источником света поместить синий светофильтр. Однако более просто и удобно для корректировки использовать светофильтр,

установленный на объективе фотоаппарата.

Конверсионные светофильтры янтарного цвета, обозначенные № 85, № 85A и № 85B, предназначены для использования при дневном освещении с пленкой типа А или В. Эти светофильтры поглощают часть лучей в синей области спектра, в меньшей степени поглощают в зеленой области и прозрачны тля лучей в красной области спектра (рис. 13.22). Характеристики некоторых конверсионных светофильтров представлены в табл. 13.2. Данные, касающиеся увеличения экспозиции, носят приближенный характер, поэтому в случае ответственных работ необходимо проводить пробную фотосъемку для определения оптимальной экспозиции. Строго говоря, в качестве лампы накаливания следует использовать специальные ротолампы. Однако светофильтр № 80A с успехом применяется в случае освещения, создаваемого бытовыми лампами накаливания. Светофильтры № 80C и № 80D применяются вместе с зазовыми лампами-вспышками в том случае, если их колбы не шеют специального голубого покрытия.

В табл. 13.2 представлены изменения цветовой темпера-

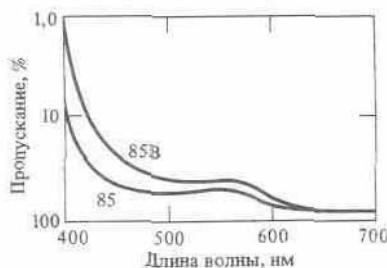


Рис. 13.22.  
Спектральные кривые пропускания светофильтров № 85 и № 85B

**Таблица 13.2. Характеристики конверсионных светофильтров**

| Цвет  | Номер                       | Изменение цветовой температуры, К | Сдвиг в майредах | Фотопленка         | Источник света                       | Увеличение экспозиции (в ступенях) |
|-------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Синий | 80A                         | 3200—5500                         | —131             | Для дневного света | Лампа накаливания                    | 2                                  |
|       | 80B                         | 3400—5500                         | —112             | То же              | Фотолампа                            | 1 <sup>2/3</sup>                   |
|       | 80C                         | 3800—5500                         | —81              | — « —              | Фотовспышка с алюминиевой проволокой | 1                                  |
|       | 80D                         | 4200—5500                         | —56              | — « —              | Фотовспышка с циркониевой проволокой | 1/3                                |
|       | Янтарный<br>85, 85<br>A 85B | 5500—3400<br>5500—3200            | 112<br>131       | Тип А<br>Тип В     | Солнечный свет                       | 2/3<br>2/3                         |

туры (сдвиг) в майредах ( $10^6/T, K^{-1}$ <sup>1</sup>). Это сделано потому, что изменения цветовой температуры в майредах подчиняются закону аддитивности. Другими словами, при использовании двух светофильтров сразу общее изменение цветовой температуры будет равно сумме изменений для каждого светофильтра в отдельности. По всей видимости, наиболее полезны светофильтры № 85B и № 80A, которые позволяют проводить съемку на фотопленку типа В для дневного освещения при свете ламп накаливания. Поскольку кратность светофильтра № 80A значительно выше, чем у № 85B, и так как уровень освещенности внутри помещения обычно намного ниже, чем на улице, предпочтение следует отдать светофильтру № 85B.

Использование коррекционных светофильтров приводит к меньшему изменению цветовой температуры по сравнению с конверсионными светофильтрами. Коррекционные светофильтры синего оттенка (номера 82, 82A, 82B и 82C) предназначены для увеличения эффективной цветовой температуры источника света, а коррекционные светофильтры желтого оттенка (номера 81, 81 A, 81B, 81C, 81D и 81EF) — для уменьшения эффективной цветовой температуры источника света. В табл. 13.3 приведены корректирующие коэффициенты для определения экспозиции и изменения цветовой температуры (сдвига) в майредах для перечисленных светофильтров. Эти светофильтры применяются для незначительного изменения цветовой температуры источников света, а также для обычных фоторабот, не являясь при этом совершенно необходимыми. Например, некоторые

электронные лампы-вспышки создают слишком «синее»

<sup>1</sup> См п. 10 — Прим. перев

**Таблица 13.3. Корректирующие коэффициенты и изменения цветовой температуры (сдвиги) в майредах для коррекционных светофильтров**

| Цвет<br>светофильтра | Номер<br>светофильтра | Увеличение<br>экспозиции (в<br>ступенях) | Сдвиг в<br>майредах |
|----------------------|-----------------------|--|---------------------|
| Синий                | 82C                   | 2/3                                      | — 45                |
|                      | 82B                   | 2/3                                      | — 32                |
|                      | 82A                   | 1/3                                      | — 21                |
|                      | 82                    | 1/3                                      | — 10                |
| Желтый               | 81                    | 1/3                                      | 9                   |
|                      | 81A                   | 1/3                                      | 18                  |
|                      | 81B                   | 1/3                                      | 27                  |
|                      | 81C                   | 1/3                                      | 35                  |
|                      | 81D                   | 2/3                                      | 42                  |
|                      | 81EF                  | 2/3                                      | 52                  |

освещение, что в свою очередь может давать слишком серый цвет кожи при портретной съемке. В этом случае, фотографируя через светофильтр № 81 или № 81A, можно избавиться от такого эффекта.

**Пример 13.3.** Фотосъемка проводится в жилой комнате, освещенной бытовыми лампами накаливания мощностью 100 Вт. Для этой цели выбрана фотопленка Kodachrome 40 типа А. Какой светофильтр надо использовать в таких условиях освещения, если необходимо получить оптимальную цветопередачу?

Обычно 100-Вт лампа имеет цветовую температуру 2900 К. Так как пленка сбалансирована на источник света 3400 К, для увеличения цветовой температуры источника необходимо воспользоваться синим фильтром. Вычислим изменение цветовой температуры для того, чтобы можно было определить необходимый светофильтр. Воспользовавшись определением величины майред, получим  $10^6 (1/3400 - 1/2900) = 294 - 345 = -51$ . Таким образом, в наших условиях наилучшие результаты даст либо коррекционный светофильтр № 82, либо конверсионный светофильтр № 80D. Но, поскольку последний светофильтр требует меньшего увеличения экспозиции, ему, вероятно, следует отдать предпочтение.

**Пример 13.4.** Используя фотопленку для дневного освещения (сбалансированную на освещение 5500 К), необходимо провести съемку при освещении лампой накаливания, цветовая температура которой составляет 2900 К. Показать, что эта

задача может быть решена при совместном использовании светофильтров № 80A и № 82B.

Изменение цветовой температуры составляет  $10^6 (1/5500 - 1/2900) = 182 - 345 = -163$ . Светофильтр № 80A обеспечивает изменение цветовой температуры, равное —131. Следовательно, необходимо дополнительное изменение цветовой температуры  $131 - 163 = -32$ , которое может быть обеспечено светофильтром № 82B. Полученный результат можно легко проверить, если учесть, что светофильтр № 80A повышает цветовую температуру света от 3200 до 5500 К, а светофильтр № 82B — от 2900 до 3200 К, так что  $10^6 (1/5500 - 1/3200) + 10^6 (1/2900 - 1/3200) = -131 - 32 = -163$ .

Фирма Tiffen выпускает набор так называемых *декамай-редовских светофильтров*, аналогичных по действию конверсионным и коррекционным светофильтрам. Этот набор состоит из четырех светофильтров синего оттенка, повышающих цветовую температуру источника света на 15, 30, 60

и 120 майред, и четырех фильтров красного оттенка, поникающих цветовую температуру на такие же величины.

### Цветокомпенсационные светофильтры

Цветокомпенсационные светофильтры разделяются на аддитивные светофильтры, выделяющие красный, зеленый и синий световые потоки, и субтрактивные светофильтры, выделяющие цвета, дополнительные к первичным, — желтый, пурпурный и голубой. Светофильтры этого типа отличаются от конверсионных и коррекционных светофильтров тем, что поглощают один или два (из трех) первичных цвета, в то время как конверсионные и коррекционные светофильтры только меняют интенсивность того или иного цвета. Цветокомпенсационные светофильтры производятся фирмой Eastman Kodak в виде фолий, средние оптические плотности которых составляют 0,025, 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 и 0,50. Например, зеленый цветокомпенсационный светофильтр 0,30 имеет среднюю оптическую плотность, равную 0,30 для лучей синей и красной частей спектра (рис. 13.23) и обозначается как CC30G(CC — color compensating, цветокомпенсационный, G — green, зеленый).

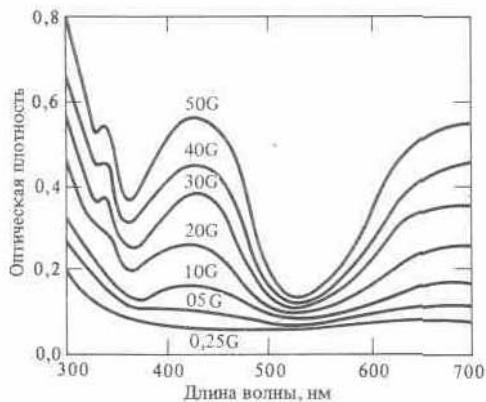


Рис. 13.23,  
Спектральные кривые оптической плотности зеленых  
цветокомпенсационных светофильтров

Стеклянные цветокомпенсационные светофильтры производятся фирмой Tiffen; их оптическая плотность изменяется в интервале 0,1—1,1, хотя и не для всех цветов. Кроме того, выбор светофильтров синего и голубого цветов несколько ограничен.

Цветокомпенсационные светофильтры могут использоваться в комбинации друг с другом, но при этом надо учитывать, что аддитивные светофильтры поглощают (вычитают) два первичных цвета из белого света, в то время как субтрактивные поглощают только

один первичный цвет. Следовательно, последний тип светофильтров представляет более широкие возможности. Например, оптическая плотность светофильтра CC50R (R—red, красный) в зеленой и синей частях спектра равна 0,5. Так как оптическая плотность светофильтра CC50M (M — magenta, пурпурный) в зеленой части спектра равна 0,5, а светофильтра CC50Y (Y—yellow, желтый) в синей части спектра — 0,5, то светофильтр CC50R дает тот же самый эффект, что и комбинация светофильтров CC50M и CC50Y, если пренебречь потерями света на отражение на двух дополнительных поверхностях. Сказанное условно можно записать как CC50R=CC50M+CC50Y, или, сокращенно, 50K=50П+50Ж. Для уменьшения световых потерь вследствие отражения от поверхностей светофильтров следует всегда использовать минимальное количество их. Согласно приведенным выше выкладкам, предпочтение следует отдать одному красному светофильтру, а не комбинации желтого и пурпурного светофильтров. При подборе необходимой комбинации светофильтров удобнее оперировать с субтрактивными цветами, даже если используются аддитивные светофильтры. Общая оптическая плотность двух светофильтров одного и того же цвета будет равна сумме оптических плотностей каждого из них. Если три субтрактивных светофильтра с одинаковой оптической плотностью используются вместе, то их общее поглощение эквивалентно действию нейтрально-серого (НС) светофильтра с той же оптической плотностью (например, 0,1Ж+0,1Ш+0,1Г=ОДНС).

Цветокомпенсационные светофильтры предназначены для компенсации аномальностей излучения источников света, а также изменений цветового баланса фотопленки, вызываемых отклонениями от закона взаимозаместимости, или изменений цветочувствительности фотопленки от партии к партии. Фильтры этого типа также применяются в фотопечати.

Не существует цветных фотопленок, которые обеспечивали бы вполне удовлетворительные результаты в условиях люминесцентного освещения. Поэтому необходимо прибегать к помощи светофильтра, тип которого зависит от вида люминесцентного освещения и используемой цветной фотопленки. Таблицы, перечисляющие соответствующие цветокомпенсационные светофильтры для разных комбинаций фотопленок и люминесцентного освещения, публикуются фирмами, производ-

ящими фотопленки<sup>1</sup>). Эти данные весьма удобны для проведения предварительных испытаний с целью определения подходящей комбинации освещения и фотопленки. Например, согласно табличным данным, для фотопленки Ektachrome 64 в условиях холодного белого

люминесцентного освещения рекомендуется использовать комбинацию светофильтров 40П+10Ж. Это означает, что необходимо применить желтый (Ж) светофильтр с оптической плотностью 0,1 (CC10Y) и пурпурный светофильтр с оптической плотностью 0,4 (CC40M), а экспозицию увеличить на одну ступень для компенсации поглощения фильтрами. Для этой же фотопленки, используемой вместе с холодным белым освещением делюкс, рекомендуется использовать комбинацию светофильтров 20Г+10П при одновременном увеличении экспозиции на 2/3 ступени. Кривые оптической плотности для этих двух светофильтров представлены на рис. 13.24. Два светофильтра вместе поглощают в ультрафиолетовой области, а максимум поглощения в видимой области спектра приходится на зеленую часть спектра в случае холодного белого света и на красную часть — в случае холодного белого освещения делюкс.

Приведенный пример показывает, что не существует светофильтра, способного скомпенсировать недостатки люминесцентного освещения. Однако фирма Eastman Kodak все же предлагает светофильтры для среднего люминесцентного освещения. Для такого освещения и пленки Ektachrome 64 фирма рекомендует светофильтр CC30M, требующий увеличения экспозиции на 2/3 ступени. Фирма Tiff en производит светофильтр FLD для использования с цветной пленкой для дневного освещения и при люминесцентном освещении и светофильтр FLB для пленки типа В. Аналогичные светофильтры изготавливает фирма Ноуа.

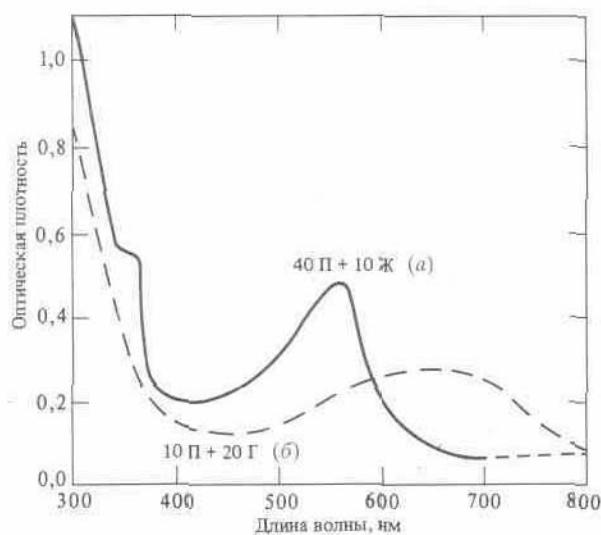


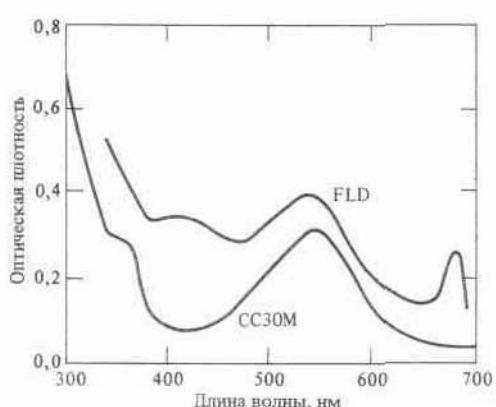
Рис. 13.24.

Спектральные кривые оптической плотности светофильтров, используемых при съемке с холодным белым (a) и холодным белым делюкс (б) люминесцентными освещениями на фотопленку Ektachrome 64.

<sup>15</sup> Kodak Color Films, Eighth Edition, Rochester, N. Y.: Eastman Kodak Co., 1980, p. DS-54.

Рис. 13.25.

Спектральные кривые оптической плотности светофильтров FLD и CC30M



На рис. 13.25 представлены спектральные кривые оптической плотности для светофильтров FLD и CC30M. Из рисунка видно подобие этих кривых, несмотря на значительное их несовпадение. Так, кривая оптической плотности, соответствующая светофильтру FLD, имеет более высокие

значения в синей части спектра и узкий пик в красной части. Фотографы, использующие светофильтры типа FLD, сообщают об удовлетворительных результатах. Отметим, что за исключением узкого пика в красной части спектра, кривая оптической плотности подобна кривой для комбинации светофильтров 40П+10Ж (рис. 13.24). Насколько хорошо работает узкий пик в красной части спектра светофильтра FLD по сравнению с более широким пиком в этой же части спектра для комбинации светофильтров 10П+20Г (рис. 13.24), зависит от конкретного спектрального состава люминесцентного освещения. По всей видимости, светофильтр FLD является универсальным, так как

подходит для всех типов люминесцентного освещения, за исключением, конечно, фотосъемки, когда требуется очень хорошее качество цветопередачи.

Для определения необходимых светофильтров при фотосъемке в условиях освещения люминесцентными или иными газоразрядными лампами применяются специальные колориметры, с помощью которых измеряют уровень яркости в определенных частях спектра. Первые приборы этого типа были пригодны для определения уровня яркости только в красной и синей частях спектра; поэтому светофильтры, необходимые в каждом конкретном случае, определялись ими не вполне удовлетворительно. В последнее время были разработаны колориметры для измерения уже в трех областях спектра — красной, зеленой и синей. Однако стоимость их довольно высока. Отклонение от закона взаимозаместимости (гл. 8) для каждого слоя фотоэмульсии цветной

фотопленки различно. Например, увеличение экспозиции требует большей коррекции для синечувствительного слоя фотопленки Ektachrome 64, чем для двух остальных эмульсий. Поэтому необходимо пользоваться синим светофильтром для увеличения доли синего цвета, достигающего фотопленки. Например, светофильтр CC15B (B — blue, синий) требует увеличения экспозиции на одну ступень в случае его использования с фотопленкой Ektachrome 64 при выдержках порядка 1 с. Фирмы, изготавливающие цветные фотопленки, представляют информацию о степени отклонения от закона взаимозаместимости, а также рекомендации по необходимым корректировкам. Как правило, коррекция необходима при выдержках, превышающих 1 с, а для некоторых фотопленок и при меньших выдержках.

**Пример 13.5.** Фотографируется группа студентов, работающих в лаборатории. Освещение лаборатории осуществляется люминесцентными лампами дневного света. Съемка проводится на фотопленку Ektachrome 160. Рекомендуемая коррекция составляет  $10K+50P+50J$  с увеличением выдержки на  $1/3$  ступени. Является ли предлагаемый вариант набора светофильтров наилучшим? Какой набор светофильтров необходимо использовать, если имеются только субтрактивные светофильтры?

Предлагаемый вариант не кажется лучшим, поскольку  $50P+50J=50K$ . Следовательно, комбинация светофильтров  $50K+10K$  будет, во-первых, эквивалентна рекомендуемой и, во-вторых, общее число оптических поверхностей перед объективом уменьшится. Если нет красных светофильтров, то комбинация  $10J+10P(=10K)$  заменяет предлагаемый вариант, но при этом общее число светофильтров достигает четырех. Сочетание выбранной фотопленки и имеющегося освещения, по всей видимости, не является оптимальным, поскольку существует фотопленка Ektachrome 200, которая требует использования только одного светофильтра CC30M. В этом случае экспозицию необходимо увеличить на  $2/3$  ступени, и, кроме того, общее число оптических поверхностей перед объективом становится минимальным.

Светофильтры для фотолаборатории

Наиболее широко в фотолаборатории используются так называемые неактиничные светофильтры. Обычно при подборе этого типа светофильтров пользуются рекомендациями, которыми снабжены фотоматериалы. Панхроматический материал требует обработки в полнейшей темноте, однако в некоторых особых случаях, когда необходимо контролировать процесс проявления, можно применять в течение нескольких секунд освещение, получаемое при использовании неактиничного светофильтра № 3 темно-зеленой окраски. Помимо того, что в каждом конкретном случае должен применяться определенный неактиничный светофильтр, следует с особой тщательностью подбирать сам источник света, используемый для освещения рабочего места, который должен располагаться на рекомендованном расстоянии от рабочей поверхности. Если лабораторное освещение может вызвать частичную засветку фотоматериала (появление вуали), то необходимо предварительно проверить качество освещения с помощью контрольного опыта.

Рис. 13.26.

Вуалирование фотобумаги при освещении ее неактиничным светом (Л Хай, 1983 г.)



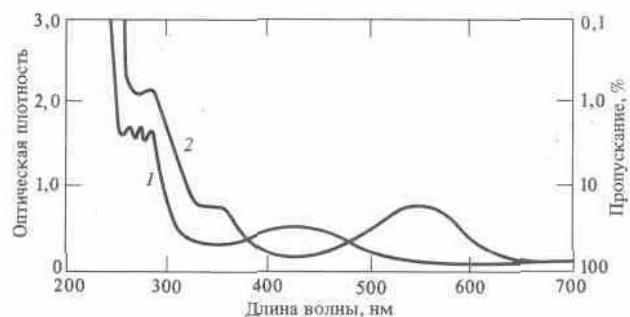
Поскольку воздействие света на фотоматериал носит накопительный характер, даже длительная экспозиция только неактиничным освещением может не приводить к образованию вуали. Например, длительное освещение фотобумаги неактиничным светом может не приводить к ее частичной засветке. Однако если ту же самую фотобумагу экспонировать в фотоувеличителе, то на ней может образоваться значительная вуаль, особенно на светлых участках. На рис. 13.26 представлен лист фотобумаги, который, за исключением верхнего левого

угла, был экспонирован в фотоувеличителе. Правая часть снимка, включая неэкспонированный участок, предварительно освещалась в течение длительного времени неактиничным светом. В левом верхнем углу вуали нет, однако светлые участки той части снимка, которая предварительно освещалась неактиничным светом, намного более темные по сравнению со светлыми участками нижней, не подвергнутой неактиничному освещению части снимка. Подобно приведенному примеру, следует проводить аналогичную проверку освещения перед использованием любого нового неактиничного светофильтра. И наконец, отметим, что любое неактиничное освещение оказывает воздействие на фотоматериал. Избыточная экспозиция фотоматериала неактиничным светом может вызывать образование вуали.

В гл. 8, в которой описывается фотобумага переменной контрастности, отмечается, что изменение состава освещения, используемого в фотоувеличителе, и, следовательно, изменение контрастности фотобумаги достигаются с помощью

Рис. 13.27.

Спектральные кривые оптической плотности и пропускания светофильтров PC-1 (1) и PC-3 (2)



получить степень контрастности фотобумаги от 1 до 4 с шагом 0,5. Светофильтры позволяют печатать с изменением цветности излучения, попадающего на фотобумагу. Светофильтры, обозначенные меньшими номерами (например, PC-1), сильнее поглощают в синей части спектра, а большими номерами (например, PC-3) — в зеленой (рис. 13.27).

Для цветной печати используются цветные светофильтры, которые аналогичны цветокомпенсационным светофильтрам. Светофильтры этого типа используются для регулирования спектрального состава света, проходящего через негатив. Эти светофильтры не имеют высокого оптического качества, и поэтому их нельзя располагать на пути пучка света, формирующего изображение. Они используются для изменения спектрального состава освещения и применяются в фотоувеличителях для черно-белой печати, приспособленных для работы с цветными фотоматериалами. Современные фотоувеличители для цветной печати снабжены вмонтированными в корпус цветными светофильтрами. Иногда эти светофильтры называют дихроичными, подразумевая, что они пропускают два из трех первичных цветов. Другими словами, такие светофильтры эквивалентны субтрактивным светофильтрам. Некоторые фотоувеличители для цветной печати имеют три раздельных источника света синего, зеленого и красного цветов с изменяемой интенсивностью, смешение которых обеспечивает необходимый цветовой состав света.

#### Упражнения

1. Из каких Материалов изготавливаются съемочные светофильтры, используемые в фотографии?
2. Пусть при фотографировании пейзажа, изображенного на рис. 13.6, используются фотопленка Kodak Plus-X Pan и светофильтр № 25. Какую выдержку необходимо использовать для диафрагмы 11?
3. Светофильтр № 25 вместе с нейтрально-серым светофильтром, пропускающим 50% падающего света, используется при фотосъемке источника света в научном эксперименте. Определить их общую кратность и на сколько ступеней уменьшается экспозиция.
4. Какие светофильтры наиболее употребительны в черно-белой и цветной фотографии при съемке на инфракрасную фотопленку?
5. Фотографируется яблоня со спелыми, красными яблоками. Какой светофильтр следует использовать, чтобы достичь контраста между плодами и зеленью листьев?
6. Изложите всевозможные способы, позволяющие уменьшить эффект дымки в цветной и черно-белой фотографии.
7. Для уменьшения освещенности фотопленки вместе с зеркально-линзовым телеобъективом используется нейтрально-серый светофильтр, оптическая плотность которого составляет 0,3. На сколько ступеней при этом уменьшено относительное отверстие, если сравнивать с обычным

соответствующих светофильтров. Фирма Eastman Kodak выпускает фотобумаги такого типа и соответствующие им светофильтры, которые используются в фотоувеличителе для изменения контрастности фотобумаги. Эти фильтры называются Polycont-rast. Такие светофильтры изготавливаются на основе специальных пластмасс либо желатины. Их использование позволяет

объективом?

8. Почему поляризационный светофильтр уменьшает отражение от неметаллических поверхностей<sup>17</sup>

9. Каким образом поляризационный светофильтр увеличивает контраст между облаками и синим небом? Какие ограничения существуют при этом?

10. Как избавиться от солнечных лучей, отраженных от поверхности воды при фотосъемке надводных скал<sup>7</sup>? Показатель преломления воды составляет около 4/3.

11. Каким образом достигнут «звездный» эффект на фотографии, показанной на рис. 13.20?

12. Вы фотографируете на фотопленку типа В вне помещения в условиях обычного солнечного дня. На сколько следует изменить цветовую температуру в майредах, чтобы цветопередача на снимке была правильной? Какой светофильтр для этого необходимо использовать<sup>9</sup>

13. Фирма Eastman Kodak рекомендует при съемке на фотопленку Kodak Ektachrome 200 в условиях дневного люминесцентного освещения использовать набор светофильтров, эффективное пропускание которых соответствует комбинации 40П+20Ж, с одновременным увеличением экспозиции на одну ступень. Объясните это

14. Опишите метод проверки надежности неактиничного освещения, используемого в фотолаборатории.

15. Какие факторы обусловливают отсутствие частичной засветки фотобумаги при использовании неактиничного освещения?

16. Каким образом светофильтры, используемые с фотобумагой переменной контрастности, вызывают изменение ее степени контрастности?

## Словарь терминов

*Аберрация* — искажение изображения, вызываемое несовершенством реальной оптической системы.

*Автоматическая электронно-импульсная лампа* — электронная вспышка с встроенным датчиком света для контроля количества света, отраженного от предмета и достигшего фотокамеры.

*Автоспуск* — устройство, обеспечивающее автоматическое срабатывание затвора фотоаппарата через определенное время после его включения.

*Автохромный процесс* — один из первых аддитивных способов цветной фотографии, основанный на цветоделении в одном светочувствительном слое фотопластиинки, содержащем окрашенный растр, который состоит из многих очень мелких светофильтров красного, зеленого и синего цветов.

*Адаптация глаза* — способность глаза приспособливаться к изменению уровня освещенности.

*Аддитивный синтез цвета* — способ получения цвета с помощью трех первичных (основных) цветов.

*Актиничный свет* — излучение, обладающее способностью воздействовать на вещество. При воздействии актиничного света на фотоматериалы в них образуется невидимое (скрытое) изображение.

*Альбуминная фотобумага* — фотобумага, светочувствительный слой которой представляет собой яичный белок с растворенными в нем галогенидами серебра.

*Амбротипия* (коллодионный позитив) — прямое позитивное изображение предмета, возникающее на мокрой колло-дионной пластинке при ее рассматривании на темном фоне.

*Анастигмат* — объектив, в котором исправлены практически все виды аберраций, в том числе астигматизм и кривизна плоскости изображения.

*Апертура* — величина, определяющая действующее отверстие объектива. Определяется размерами линз или диафрагмы, ограничивающими поток света, проходящий через объектив.

*Апланат* (светосильный Ректилинеар) — объектив, в котором исправлены сферическая аберрация, кома, хроматические аберрации и дисторсия.

*Апохромат* — объектив, у которого исправлены сферическая и хроматическая аберрации для трех или более цветов,

например для фиолетового (0,434 мкм), зеленого (0,546 мкм) и красного (0,656 мкм).

*ASA* — единица светочувствительности (от начальных букв английского наименования American Standards Association — Американская ассоциация стандартов).

*Астигматизм* — один из видов аберраций сферической линзы, проявляющийся в том, что изображение точки, расположенной на оптической оси, представляет собой два взаимно перпендикулярных отрезка прямой линии, расположенных на некотором расстоянии друг от

друга.

*Астигматизм глаза* — дефект глаза, приводящий к созданию нерезкого изображения. Обычно вызывается отклонением формы роговой оболочки от сферической.

*Асферические объективы* — обеспечивающие повышенную коррекцию аберраций объективы, линзы которых имеют более сложную, чем сферическая, форму поверхности.

*Ахромат.* 1) Собирающая линза, изготовленная из двух склеенных стеклянных линз, у которой исправлена хроматическая аберрация для двух цветов. 2) Объектив, у которого исправлена хроматическая аберрация для двух цветов [например, для фиолетового (0,43 мкм) и желтого (0,589 мкм)].

*Бесконденсорный (диффузный) фотоувеличитель* — фотоувеличитель, в котором освещение негатива осуществляется рассеянным светом.

*Бипризма Френеля* — устройство, состоящее из пары (или нескольких пар) прямоугольных стеклянных призм и используемое в фотоаппаратах для наводки на резкость.

*Бихроматная желатина* — желатина, обработанная раствором бихромата и обладающая свойством твердеть под действием света.

*Бочкообразная дисторсия* — один из видов аберрации оптических систем, обусловленной тем, что степень увеличения центральной части изображения больше, чем периферийной.

*Ведущее число (K)* — величина, характеризующая экспонирование при фотосъемке в условиях импульсного освещения.

*Видоискатель (визир)* — устройство в фотоаппарате, служащее для определения границ изображения, которое будет иалучено на фотопленке во время съемки.

*Визуальная эквивалентно-серая плотность* — денисито-метрическая мера поверхностной концентрации каждого кра-сителя-субтрактора, образующего цветное позитивное изображение. «*Вилка*» — метод получения правильной экспозиции, предусматривающий дополнительную съемку объекта с большими и меньшими экспозициями.

*Вогнутая линза* — отрицательная (рассеивающая) линза, центральная часть которой тоньше, чем края, в результате чего падающие на линзу параллельные лучи света при выходе из нее расходятся.

*Воздушная перспектива* — разновидность тональной перспективы, при которой глубина пространства на снимке создается благодаря наличию воздушной дымки.

*Время осветления* — время, в течение которого неэкспонированные участки эмульсии становятся прозрачными в процессе фиксирования.

*Вуаль* — почернение фотослоя неэкспонированного фотоматериала после его химико-фотографической обработки.

*Выдержка* — интервал времени, в течение которого свет воздействует на светочувствительный материал.

*Выпуклая линза* — положительная (собирающая) линза, центральная часть которой толще, чем края, в результате чего падающие на линзу параллельные лучи света при выходе из нее сходятся.

*Входной зрачок* — изображение апертурной диафрагмы, образуемое частью оптической системы, расположенной перед диафрагмой.

«*Вытягивание*» изображения — увеличение экспозиции некоторой, определенной части фотоснимка в процессе печати.

*Высококонтрастное изображение* — изображение с большим перепадом яркости.

*Выходной зрачок* — изображение апертурной диафрагмы, образуемое частью оптической системы, расположенной за диафрагмой.

*Вялое изображение* — изображение с низким перепадом яркости.

*Галогениды серебра* — соединения серебра с галогенами (броном, хлором, фтором и иодом).

Обладают способностью чернеть под действием света и представляют собой светочувствительные компоненты фотоэмульсий.

*Гамма (у)* — угол наклона прямолинейного участка характеристической кривой для черно-белой фотопленки.

*Гелиография* — способ получения устойчивого изображения, открытый Н. Ньюсоном и основанный на использовании в качестве светочувствительного вещества асфальтового лака.

*Гиперсенсибилизация* — процесс дозированной засветки фотоматериалов, приводящий к увеличению их пороговой чувствительности .

*Гиперфокальное расстояние* — минимальное расстояние от объектива до такой плоскости в пространстве предметов, при фокусировке на которую объектива задняя граница резко

*изображаемого пространства* находится в бесконечности.

*Глубина резко изображаемого пространства* — максимальное расстояние между предметами в пространстве, изображаемыми объективом достаточно резко.

*Глубина резкости* — максимальное расстояние между резкими изображениями предмета в поле изображений объектива.

*Глянцевая фотобумага* — фотобумага, обладающая более или менее зеркальной поверхностью.

*Голубой цвет* — цвет, дополнительный к красному. Объ-

екты, окрашенные в голубой цвет, отражают синие и зеленые и поглощают красные лучи.

*Гранулярность* — неоднородность распределения оптической плотности почернения равномерно экспонированного и проявленного фотоматериала.

*Гуммиарабик* — смола некоторых деревьев, растущих в Африке, которая после обработки раствором бихромата затвердевает (дубеет) под воздействием света.

*Дагерротипия* — один из способов получения устойчивого изображения, в котором впервые был применен в качестве светочувствительного материала иодид серебра, наносимый на металлическую пластинку.

*Дальномер фотоаппарата* — оптическое устройство, позволяющее определять расстояние до объекта съемки. При помощи дальномера осуществляется фокусировка объектива фотоаппарата.

*Двухобъективный зеркальный фотоаппарат* — фотоаппарат, объектив видоискателя которого дает изображение объекта съемки такого же масштаба, что и съемочный объектив.

*Денситометр* — прибор для измерения оптической плотности проявленных фотопленок, фотопластинок или фотобумаг.

*Дефект кристаллической решетки* — любое отклонение от ее идеального периодического строения.

*Диазопроцесс* (диазотирование) — фотохимический процесс копирования, в котором диазосоединения в соответствующей среде взаимодействуют с краскообразующим веществом с образованием окрашенного азокрасителя.

*Диапозитив* — позитивное изображение на прозрачной основе (стекле или фотопленке), которое можно рассматривать на просвет или проецировать на экран. Диапозитивы могут быть черно-белыми или цветными.

*Диафрагма объектива* (ирисовая диафрагма) — устройство, устанавливаемое либо внутри объектива, либо за ним и обеспечивающее ограниченное регулирование светового пучка, достигающего плоскости фотопленки.

*Диафрагменное число объектива* — число, равное отношению заднего фокусного расстояния объектива к диаметру его входного зрачка (мера светосилы). В значениях диафрагменного числа градуируются шкалы диафрагм на оправе объектива; ряд численных значений диафрагменного числа выбирается так, что он образует геометрическую прогрессию со знаменателем " $\sqrt{2}$ " (например, 1, 1,4, 2, 2,8, 4, 5,6 и т.д.) При переходе от одного значения диафрагменного числа к соседнему освещенность изменяется в два раза.

*DIN* — единица светочувствительности фотоматериалов (сокращение наименования Deutsche Industrie Norm — Немецкий промышленный стандарт).

*Диоптрия* — единица измерения оптической силы линзы; имеет размерность  $m^{-1}$ .

*Дисперсия света* — зависимость показателя преломления среды от частоты или длины волны света.

*Дисторсия* — один из видов aberrаций оптических систем, при котором нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением. Различают подушкообразную и бочкообразную дисторсии.

*Дифракция* — совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резко выраженным неоднородностями (например, при прохождении света через небольшое отверстие в непрозрачном экране). При этом имеет место отклонение от закона прямолинейного распространения света.

*Диффузионно-фотографический процесс* — фотографический процесс, в котором позитивное изображение формируется переносом неэкспонированного галогенида серебра с негатива на приемный слой, где оно проявляется, образуя позитив (например, черно-белый процесс фирмы «Поляроид»).

*Дихроичный кристалл* — оптически асимметричный кристалл, селективно поглощающий свет.

Поглощение зависит от ориентации кристалла и плоскости поляризации падающего света.

*Дихроичные светофильтры* — светофильтры, поглощающие из белого света одну треть спектра и пропускающие лучи двух третей спектра, обладающие дополнительными цветами. Используются при аддитивном синтезе цвета.

*Длиннофокусный объектив* — объектив, у которого фокусное расстояние более чем в 1,5 раза

превосходит диагональ кадра (поля изображения).

*Дневное освещение* — свет, создаваемый естественными дневными источниками света.

*Дополнительные цвета* — любые два цвета, создающие в смеси белый цвет. Цвета голубой (сине-зеленый), желтый (зелено-красный) и пурпурный (сине-красный) являются дополнительными цветами к первичным цветам — соответственно красному, синему и зеленому.

*Желатиновый светофильтр* (фолия) — светофильтр, изготовленный из окрашенной желатины.

*Желтый цвет* — цвет, дополнительный к синему. Объекты желтого цвета отражают зеленый и красный цвета и поглощают синий.

*Закон Брюстера* — закон, устанавливающий зависимость угла Брюстера от показателей преломления сред (среды, в которой распространяется свет, и среды, от поверхности которой отражается свет).

*Закон взаимозаместимости* (Бунзена — Роско закон) — закон, согласно которому экспозиция  $H$  равна произведению освещенности  $E$  на время экспонирования  $t$ .

*Закон обратных квадратов* — закон, согласно которому интенсивность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения до объекта съемки.

*Замедлители* — вещества (например, бромид калия), добавляемые к проявителю для ингибирования проявления неэкспонированных зерен галогенидов серебра. Используются также в качестве противовалирующих веществ.

*Заполняющий свет* (выравнивающий свет) — свет, используемый для подсветки теней, создаваемых основным светом при фотографировании объекта.

*Затвор* — устройство фотокамеры, позволяющее регулировать время экспонирования (выдержку) при съемке.

*Защитные светофильтры* — светофильтры, используемые для освещения фотокомнаты во время печати.

*Зернистость* — неоднородность почернения равномерно экспонированного и проявленного фотоматериала.

*Зерна* — микрокристаллы галогенидов серебра в фотоэмulsionии, размеры которых влияют на чувствительность фотопленки к свету. Высокочувствительные пленки имеют довольно крупные зерна, которые после обработки могут стать настолько крупными, что будут заметны на изображении. Такое изображение принято называть зернистым.

*Зональная система* — система определения экспозиции и времени проявления фотопленки, позволяющая управлять фотопроцессом.

*Интерференция света* — оптическое явление, возникающее при взаимодействии (наложении) двух или более световых волн.

*Источники света* — излучатели электромагнитной энергии в видимой части спектра.

Подразделяются на естественные (Солнце, Луна и т.д.) и искусственные (лампы накаливания, газоразрядные лампы и др.).

*Инфракрасное излучение* — излучение, длина волны которого находится за пределами видимой части спектра. Некоторые специальные фотопленки (черно-белые и цветные) сенсибилизированы для фотосъемки в ИК-лучах и используются для научных работ.

*Кадрирование* — выбор границ и формата изображения.

*Калотипия* (талботипия) — способ получения устойчивого изображения, основанный на использовании фотобумаги, содержащей галогениды серебра.

*Камера-обскура* — одно из первых устройств для проецирования и копирования изображений.

*Кассета* — светонепроницаемое приспособление, в котором помещается фотоматериал во время фотосъемки.

*Катализатор* — вещество, изменяющее скорость химической реакции, но не расходующееся в ней.

*Ключевой тон* — метод корректировки показаний экспонометра по известной отражательной способности одного из снимаемых объектов.

*Коллодионная мокрая пластинка* — стеклянная пластина, покрытая вязким раствором коллоидия, в котором растворены галогениды серебра. Экспонировалась в мокром состоянии.

*Колориметр* — прибор для изучения цвета.

*Колориметрия* — наука о методах измерения и количественном выражении цвета.

*Кольцевая вспышка* — специальная электронно-импульсная лампа с кольцевой трубкой и рефлектором, помещаемая вокруг объектива фотокамеры, дающая почти бесстеневое освещение. Используется при макросъемке.

*Кома* — один из видов aberrации оптической системы, в результате которой изображение точки, находящейся вне оптической оси, имеет вид несимметричного пятна (по форме напоминающего

запятую).

*Конверсионные светофильтры* — синие и желтые светофильтры, которые позволяют смещать цветовую температуру источника света таким образом, что фотопленки, сбалансированные для одного типа освещения, могут быть использованы при другом типе освещения (например, фотопленки для дневного освещения используются при освещении лампами накаливания).

*Конденсор* — система линз в светителе фотоувеличителя или проектора, формирующая коллимированный пучок света.

*Конденсорный фотоувеличитель* — увеличитель, в котором негатив освещается коллимированным пучком света, формируемым конденсором.

*Контактная головка* («горячий башмак») — специальные полозки на корпусе фотоаппарата, обеспечивающие соединение синхроконтактов лампы-вспышки и фотоаппарата.

*Контактная печать* — способ печатания изображения, при котором негатив прижимается к позитивному материалу. При контактной печати получают фотоотпечатки, по размеру равные оригиналам.

*Контраст*. 1) Контраст объекта съемки представляет собой отношение яркостей самой светлой и самой темной частей объекта. 2) Контраст фотографического изображения — тональная характеристика изображения, характеризующая различие в светлоте его наиболее ярких и наиболее темных участков. 3) Контраст освещения — величина, характеризующая различие яркостей различных участков объекта.

*Контрастность фотобумаги* — градация фотобумаги по степени ее контрастности.

*Контрастные светофильтры* — светофильтры, которые применяются в черно-белой фотографии для повышения контраста объектов различного цвета, обладающих одинаковой отражательной способностью.

*Контровое освещение* — освещение, используемое для создания бликов света на голове модели.

*Короткофокусный объектив* — объектив, в котором отрицательная линза расположена перед положительной таким образом, чтобы задняя главная плоскость объектива располагалась позади системы линз.

*Корректирующие светофильтры* — светофильтры, предназначенные для компенсации повышенной чувствительности черно-белых фотопленок к синему и ультрафиолетовому излучению.

*Коэффициент отражения* — отражательная способность, выраженная в процентах.

*Краскообразующие вещества* — соединения, которые используются во многих цветных фотографических процессах для образования красителей, формирующих цветное изображение.

*Кратность светофильтра* — число, показывающее, во сколько раз уменьшается освещенность фотопленки вследствие использования светофильтра, расположенного между предметом и фотопленкой.

*Кривая спектральной чувствительности* — изменение чувствительности фотэмulsionии в зависимости от длины волны падающего света. Используется для характеристики спектральной чувствительности отдельных слоев эмульсии на многослойной цветной фотопленке.

*Кривизна поля изображения* — один из видов aberrаций оптических систем, характеризующийся тем, что резкое изображение плоского предмета лежит на искривленной поверхности.

*Критерий светочувствительности* — точка характеристической кривой, по которой определяется светочувствительность черно-белых фотоматериалов и которая отвечает заданному фотографическому эффекту.

*Кружок рассеяния* — искаженное изображение точки, образуемое реальной оптической системой.

*Лампа-вспышка* — разовый источник света, обеспечивающий импульсное освещение при сгорании тонкой проволоки, фольги или порошкообразного металла в атмосфере кислорода.

*Латенсификация* — процесс, в котором недостаточно экспонированная фотопленка подвергается слабой дополнительной засветке, что приводит к усилению деталей теней.

*Линейная пара* — понятие, используемое в тест-объектах (мирах) и представляющее собой штрих тест-объекта вместе с ближайшим интервалом.

*Линейная перспектива* — кажущееся уменьшение размеров одинаковых предметов по мере их удаления от точки съемки.

*Линейное увеличение* — отношение высоты создаваемого объективом изображения к высоте предмета.

*Люминофор* (фосфор) — вещество, излучающее свет при воздействии на него электромагнитного излучения.

*Майрэд* — единица измерения температуры излучения абсолютно черного тела, равная  $10^6/\Gamma$ , где

*T* — температура абсолютно черного тела в Кельвинах.

*Макрообъектив* — объектив, используемый в макрофотографии и представляющий собой обычный объектив, помещенный в специальный корпус переменной длины.

*Макрофотография* — съемка, при которой размеры изображения и объекта одного порядка величины.

*Маскирование* — метод устранения цветовых искажений путем изменения тонов цветоделенных изображений в процессе их получения.

*Матовая фотобумага* — фотобумага, обладающая диф-фузно-отражающей поверхностью.

*Менисковая линза* — положительная (собирающая) линза, одна поверхность которой выпуклая, а другая — вогнутая.

*Моделирующий свет* — свет, используемый для акцентирования отдельных частей лица или костюма.

*Монохроматический свет* — свет одной частоты.

*Накальный источник света* — искусственный источник света с непрерывным спектром излучения (например, бытовая электрическая лампа).

*Направленный свет* — узкий, яркий луч света, создаваемый прожектором.

*Нарушение закона взаимозаместимости* (эффект Шварцшильда) — явление невзаимозаместимости, наблюдаемое для реальных фотоматериалов. В случае очень низких уровней освещенности при уменьшении интенсивности света в два раза может возникнуть необходимость увеличения экспозиции не в два раза, а больше.

*Насадочная линза* — линза, используемая в макрофотографии.

*Неактиничный свет* — свет, не вызывающий образования вуали у фотобумаги.

*Негатив*. 1) Черно-белый негатив — фотографическое изображение, относительное распределение яркостей которого обратно распределению яркостей фотографируемого объекта. 2) Цветной негатив — фотографическое изображение, цвет любого элемента которого является дополнительным к цвету соответствующего элемента объекта съемки.

*Нейтрально-серые светофильтры* — светофильтры, уменьшающие освещенность фотопленки без существенного изменения спектрального состава света.

*Нейтрально-серый светофильтр переменной плотности* — нейтрально-серый светофильтр, оптическую плотность которого можно непрерывно изменять. Обычно это пара поляризационных светофильтров.

*Оборачивающее кольцо* — металлическое кольцо с наружными резьбами на обоих концах, с помощью которого объектив может присоединяться к корпусу фотокамеры своей лицевой стороной. Используется в некоторых случаях в макрофотографии.

*Обращение изображения* — процесс получения позитивного изображения на том же фотоматериале, на который производилась фотосъемка.

*Объектив с переменным фокусным расстоянием* (зум-объектив) — объектив, фокусное расстояние которого, а еле-

довательно, и угловое поле зрения могут изменяться в пределах, устанавливаемых его конструкцией. Фокусное расстояние изменяется либо ступенчато — объектив с дискретным изменением фокусного расстояния, либо плавно — так называемый панкра-тический объектив.

*Однообъективный зеркальный фотоаппарат* — фотоаппарат, у которого съемочный объектив используется одновременно как объектив видоискателя.

*Одноступенчатый способ получения цветного изображения* — способ получения цветного изображения, основанный на принципе превращения негативного изображения в позитивное. В этом методе используются специальные, очень сложные по своему строению негативно-позитивные фотоматериалы, включающие в себя необходимые химикалии и позволяющие получить цветной отпечаток за несколько минут после фотосъемки.

*Оптическая плотность в отраженном свете* — величина, равная десятичному логарифму отношения яркости участка фотоотпечатка без почернения к яркости участка с почернением.

*Оптическая плотность основы и вуали* — минимальная оптическая плотность фотопленки, определяемая оптической плотностью проявленных фоновых зерен.

*Оптическая поверхность* — граница раздела двух оптических сред с различными показателями преломления.

*Оптическая сила* — величина, обратная длине фокусного расстояния линзы, измеренной в метрах.

*Ортохроматические фотоматериалы* — черно-белые фотоматериалы, обладающие светочувствительностью ко всему видимому спектру, за исключением красной области.

*Основа фотоматериала* — носитель эмульсионных слоев.

*Основной (ключевой) свет* — основной свет, определяющий характер освещения снимаемых объектов.

*Основные (первичные) цвета* — три цвета, смесь которых в определенной пропорции дает белый цвет. Обычно за основные цвета принимают красный, зеленый и синий.

*Острота* — показатель субъективно воспринимаемой резкости границ участков негатива с высокой и низкой оптической плотностью.

*Отбеливание* — одна из стадий обработки фотоматериалов, в результате которой проявленное, металлическое, серебро переходит в растворимые в воде соединения и вымывается из фотоэмульсии.

*Относительное отверстие* — отношение диаметра действующего отверстия объектива к его главному фокусному расстоянию.

*Отражательная способность* — величина, равная отношению светового потока, отраженного от поверхности, к световому потоку, падающему на поверхность.

*Отражение света* — явление, возникающее на границе

раздела двух сред и заключающееся в том, что падающий на границу раздела свет частично отражается в первую среду.

*Павильонная фотокамера* — фотоаппарат большого формата для съемок в студии, павильоне и на натуре. Светочувствительный материал размещается в плоских кассетах.

*Панхроматические фотоматериалы* — черно-белые фотоматериалы, обладающие светочувствительностью ко всему видимому спектру.

*Параксиальные лучи* — лучи, параллельные оптической оси линзы и проходящие вблизи оси.

*Параллакс* — эффект несовпадения границ кадра, наблюдаемого через видоискатель, и кадра, формируемого объективом на фотопленке. Возникает вследствие несовпадения осей видоискателя и объектива фотоаппарата.

*Пентапризма* — стеклянная пятиугольная призма, используемая в видоискателях однообъективных зеркальных фотоаппаратов. Дает прямое изображение предмета.

*Перспектива* — передача на плоскости фотоснимка объемности изображения предметов, создающая ощущение глубины пространства.

*Плоскополяризованная волна* — поперечная волна, колебания в которой совершаются в одной плоскости.

*Поглощение* — явление ослабления яркости света при его прохождении через вещество или отражении от поверхности.

*Пограничные эффекты проявления* — явления, вызывающие искажения изображения и определяемые диффузией компонентов проявителя и продуктов реакции.

*Подушкообразная дисторсия* — один из видов aberrаций оптических систем, обусловленный тем, что степень увеличения центральной части изображения меньше, чем периферийной.

*Позитив* — фотографическое изображение, тона которого соответствуют распределению яркостей объекта съемки.

*Показатель преломления* — мера оптической плотности среды, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в среде.

*Поле зрения объектива* — полное изображение, создаваемое фотографическим объективом.

*Поле изображения* — та часть сцены, которую можно запечатлеть на фотопленке.

*Полезный интервал логарифмов экспозиций* — интервал логарифмов экспозиций, который можно реализовать на фотобумаге данного типа при фотопечати с негатива.

*Поляризационный светофильтр* — светофильтр, преобразующий неполяризованный или частично поляризованный свет в плоскополяризованный. Предназначен главным образом для ослабления или устранения на изображении бликов, появляющихся при отражении света от неметаллических поверхностей, а также для устранения атмосферной дымки, возникающей в результате частичной поляризации солнечного света на молекулах атмосферного воздуха.

*Поляризация света* — физическая характеристика оптического излучения, описывающая неэквивалентность различных направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

*Преломление света* — явление, происходящее на границе раздела двух прозрачных сред и состоящее в том, что падающий луч света при прохождении границы раздела изменяет свое первоначальное направление.

*«Притемнение» изображения* — используемый в фотопечати метод, при котором некоторый участок кадра получает относительно меньшую экспозицию по сравнению с остальными участками во время экспонирования фотобумаги.

*Пропускание света* — отношение яркости света, прошедшего через проявленный отрезок фотопленки, к яркости падающего света.

*Просветленный объектив* — объектив, оптические поверхности элементов которого, граничащие с воздухом, покрыты тонким слоем прозрачного материала для уменьшения поверхностного отражения света и предотвращения образования бликов.

*Противовалирующие вещества* — вещества, уменьшающие образование фотографической вуали фотоматериалов в процессе их проявления. В качестве противовалирующих веществ используют так называемые замедлители.

*Противоиреольный слой* — один из слоев фотоматериала, поглощающий свет, прошедший фотоэмulsionю и отразившийся от подложки.

*Проявитель* — восстанавливающий агент, который превращает в металлическое серебро экспонированные зерна гало-генида серебра скрытого изображения.

*Проявление* — процесс, в результате которого скрытое изображение светочувствительного слоя фотоматериала становится видимым,

*Пурпурный цвет* — цвет, дополнительный к зеленому. Объекты пурпурного цвета отражают красный и синий цвета и поглощают зеленый.

*Раздвижной мех* — гофрированный светонепроницаемый тканевый или пластиковый мех, используемый в складных фотокамерах, фотоувеличителях и в приспособлениях для макропротографии

*Разрешающая способность* — способность фотопленок воспроизводить мелкие соседние детали объекта съемки.

*Разрешающая способность глаза* — минимальный диаметр пятна, которое рассматривается с расстояния наилучшего зрения и которое человеческий глаз может отличить от геометрической точки.

*Разрешающая способность объектива* — свойство фотографического объектива раздельно передавать на оптическом изображении близко расположенные линии. Минимальное расстояние, на котором две линии передаются еще раздельно,

называется линейным пределом разрешения

*Рамочный видоискатель* — видоискатель, обычно устанавливаемый на складных фотокамерах и представляющий собой проволочную рамку и непрозрачную планку со смотровым отверстием (диоптром)

*Рассеиватель* — пластинка матового или молочного стекла, используемая в осветителе бесконденсорного фотоувеличителя для создания рассеянного света

*Резкость изображения* — степень<sup>1</sup>- размытости границы между двумя соседними участками изображения с разной оптической плотностью

*Рикошетирующая вспышка* — метод освещения лампой-вспышкой, при котором свет отражается на объект от какой-либо поверхности (например, потолка), что позволяет получить рассеянное освещение

*Сверхкомпенсационные светофильтры* — светофильтры, используемые с черно-белой пленкой для создания резкого («драматического») эффекта путем изменения спектрального баланса света, падающего на фотопленку

*Света 1) Самые яркие участки объекта 2) Самые светлые тона позитива*

*Световой блик* — яркий световой участок объекта или фотографии, вызываемый отражением света зеркальной поверхностью

*Светокопия* — копия рисунка, отпечатка или текста, изготовленная с помощью фотохимического процесса, в котором соли трехвалентного железа превращаются в соли двухвалентного железа, создавая синий негатив оригинала

*Светорассеяние* — ухудшение оптического изображения вследствие отражения света от поверхностей объектива и внутренних частей фотоаппарата

*Светосила объектива* — отношение освещенности фотографического изображения, образованного объективом в плоскости светочувствительного материала (фотопленки), к яркости фотографируемого объекта

*Светосинхронизатор* — электронное устройство, синхронизующее включение дополнительных импульсных осветителей, не подключенных непосредственно к фотоаппарату

*Светофильтр* — оптическое приспособление, обычно изготавляемое из стекла, желатины или пластика, для изменения спектрального состава излучения Устанавливается либо на оптическом пути объектива фотоаппарата, либо перед источником света

*Светофильтр, ослабляющий воздействие атмосферной дымки* — светофильтр, поглощающий ультрафиолетовый свет и коротковолновую часть синего света и используемый при фотографировании сюжета, затемненного дымкой

*Светофильтры для специальных эффектов* — светофильтры, предназначенные для видеоизменения изображения и формирования необычных эффектов на фотопленке

*Сенсибилизаторы* — вещества (главным образом соединения серы), вводимые в фотографическую эмульсию для увеличения ее светочувствительности и расширения области спектральной

чувствительности.

*Сенситометрия* — учение об измерении фотографических свойств различных фотоматериалов.

*Серая карта* (серый эталон) — специальная карта с коэффициентом отражения 18%, используемая для определения экспозиции. Имеет ту же отражательную способность, что и «средний» объект. Применяется для определения экспозиции, в особенности когда объект съемки светлее или темнее среднего.

*Система МКО* (МКО — международная комиссия по освещению) — психофизическая система цветности, основанная на аддитивном принципе синтеза цветов тремя излучениями основных цветов (красного, зеленого и синего).

*Система TTL* — система определения экспозиции в одно-объективных зеркальных фотокамерах. Показания регистрируются одним или несколькими фотоприемниками, измеряющими количество света, прошедшего через объектив, на матовом стекле экрана видоискателя. Позволяет видеть всю площадь объекта, для которого определяется экспозиция, и автоматически учитывает величину установленной диафрагмы.

*Скрытое изображение* — невидимые глазом химические изменения, возникающие в светочувствительном слое фотоматериала в процессе его экспонирования.

*Созревание фотоэмulsionии* — процесс, происходящий при нагревании эмульсии во время ее приготовления и приводящий к росту зерен и к изменению распределения их размеров.

*Соляризация* — явление уменьшения общей оптической плотности негатива при очень интенсивном освещении. В результате этого явления происходит частичное обращение фотографического изображения (превращение негативного изображения в позитивное). Иногда это явление ошибочно приписывают эффекту Сабатье.

*Спектральная кривая оптической плотности красителя* — кривая, которая представляет собой относительную оптическую плотность красителя как функцию длины волны. Используется для характеристики красителей в цветных фотопленках и фотобумагах.

*Спектральная чувствительность* — светочувствительность фотоматериала по отношению к монохроматическому излучению определенной длины волны.

*Спечатывание* — фотографический способ получения изображения на специальной фотобумаге, минуя стадию проявления.

*Способ печати с переносом цвета* — цветоделенный процесс, используемый при изготовлении цветных отпечатков. В настоящее время применяется при копировании произведений искусства, ния устойчивого изображения (прямого позитива) с помощью металлической пластины, окрашенной черной или темно-коричневой эмалью и покрытой фотоэмulsionией.

*Тональная перспектива* — ощущение глубины пространства на снимке, вызываемое изменением тонов предметов по мере их удаления.

*Тонирование (вирирование) изображения* — процесс превращения черно-белого изображения в окрашенное, в основе которого лежит химический процесс замещения металлического серебра фотослоя на окрашенное соединение другого металла (например, железа или меди).

*Точечный экспонометр* (спотметр) — специальный тип экспонометра отраженного света, измеряющий яркость очень малых участков объекта. Обычно светочувствительный элемент такого экспонометра обладает углом восприятия 1°.

*Триплет Кука* — асимметричный объектив, состоящий из трех элементов и исправленный на астигматизм и кривизну поля изображения

*Угловое разрешение* — угол, вершина которого совпадает с центром глаза, а величина определяется размером предельного кружка, наблюдаемого с расстояния наилучшего зрения (25 см).

*Угол Брюстера* (угол полной поляризации) — угол падения луча неполяризованного света, при котором весь свет, отраженный от поверхности диэлектрика, является плоскополяризованным.

*Угол зрения объектива* — угол, под которым видно поле зрения объектива из его главной задней точки.

*Угол изображения объектива* — угол, образованный лучами света, соединяющими диагональ кадра с задней главной точкой объектива. В зависимости от величины угла изображения фотообъективы делятся на нормальные (угол изображения 45—65°), широкоугольные (75° и больше), длиннофокусные (30° и меньше).

*Угол отражения* — угол между нормалью к поверхности и отраженным лучом света.

*Угол падения* — угол между нормалью к поверхности и лучом, падающим на эту поверхность.

*Угол преломления* — угол между нормалью к поверхности и преломленным лучом света.

*Удлинительные кольца* — металлические кольца, помещаемые между корпусом однообъективного зеркального фотоаппарата и объективом. Используются в макрофотографии для увеличения размеров изображения.

*Ускоряющие вещества* — щелочи, вводимые в проявитель для управления скоростью проявления.

*Фактор растяжения* — корректирующий коэффициент, используемый в макрофотографии и показывающий изменение относительного отверстия объектива.

*Физическое проявление* — процесс проявления, в котором галогениды серебра сначала растворяются, а потом превращаются в металлическое серебро в растворе.

*Фиксаж* — химический реактив, используемый для растворения невосстановленных галогенидов серебра в фотоэмulsionии.

*Фиксирование изображения* (закрепление) — процесс стабилизации изображения, в результате которого галогениды серебра фотослоя, оставшиеся невосстановленными при проявлении, переходят в растворимые несветочувствительные соединения серебра.

*Флешметр* — специальный экспонометр для измерения света, создаваемого импульсным освещением.

*Фокальная плоскость объектива* (линзы) — плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через фокус.

*Фокусное расстояние* — расстояние от тонкой линзы до точки, являющейся изображением бесконечно удаленного объекта.

*Фоновый свет* — свет, используемый для освещения фона, перед которым располагается снимаемый объект.

*Фотобумага переменной контрастности* — фотобумага, полезный интервал экспозиций которой может изменяться при использовании соответствующих светофильтров во время печати.

*Фотографическая широта* — величина, характеризующая способность фотоматериала воспроизводить с одинаковой степенью контрастности различия в яркостях участков оптического изображения объекта съемки.

*Фотометр* — прибор для измерения величин, определяющих оптическое излучение (обычно одной или нескольких величин).

*Фотопленка с большой областью недодержек* — фотопленка, наклон характеристической кривой которой изменяется незначительно при низких оптических плотностях.

*Фотопленка с малой областью недодержек* — фотопленка, наклон характеристической кривой которой изменяется резко при низких оптических плотностях.

*Фотопленка с условным цветовоспроизведением* — трехслойная обращаемая цветная фотопленка, сконструированная таким образом, что синие, зеленые, красные и инфракрасные лучи, испускаемые предметом, переходят соответственно в черные, синие, зеленые и красные цвета в проявленном диапозитиве.

*Фотоувеличитель* — оптическое устройство, предназначенное для получения фотокопий проекционным способом с прозрачных негативов.

*Фотоэлемент* — устройство, генерирующее электрический ток под действием света.

*Фотоэмulsionия* — водный раствор желатины с равномерно распределенными микрокристаллами галогенида серебра. Кроме того, в состав фотоэмulsionии входят вспомогательные вещества, придающие ей те или иные дополнительные свойства (сенсибилизирующие, дубящие, стабилизирующие и т. д.).

*Характеристическая кривая* (кривая Хартера и Дриф-фильда) — кривая, описывающая зависимость между оптической плотностью почернения фотографического слоя фотоматериала и логарифмом экспозиции.

*Химическое проявление* — процесс проявления, в котором галогенид серебра в зерне превращается в металлическое серебро.

*Хроматическая aberrация* — одна из основных aberrаций оптических систем, обусловленная зависимостью показателя преломления среды от длины волн, проходящего сквозь нее света.

Существуют два типа хроматической aberrации: хроматизм положения и хроматизм увеличения.

*Хромогенные черно-белые фотопленки* — негативные фотопленки, в которых вместо соединений серебра используются краскообразующие вещества.

*Цветное проявление* — процесс, в котором специальные цветные компоненты (краскообразующие вещества) образуют красители цветного изображения. Образование этих красителей происходит в результате реакции сочетания цветных компонентов органических соединений с первичными продуктами окисления цветных проявляющих веществ.

*Цветные светофильтры для печати* — светофильтры, предназначенные для коррекции цвета при цветной фотопечати. Помещаются между источником света и негативом (позитивом).

*Цветовая диаграмма МКО* — диаграмма, показывающая положения всех цветов, представленных в системе МКО

*Цветовая температура* — величина, характеризующая спектральный состав излучения источника света. Определяется температурой абсолютно черного тела, при которой его излучение имеет такой же спектральный состав и такое же распределение энергии по спектру, как и излучение данного источника.

*Цветовой тон* — одна из трех системных характеристик цвета в цветовой системе Манселла. Аналог насыщенности цвета.

*Цветоделенная матрица* — окрашенная желатина, используемая для передачи цвета специальной фотобумаге в процессе печати с переносом цвета.

*Цветоделенные негативы* — три черно-белых негатива, получаемые при съемке предмета через красный, зеленый и синий светофильтры и используемые для образования цветного изображения.

*Цветodelящая фотокамера* — камера, в которой световой пучок, прошедший через объектив, делится на три цветоде-ленных изображения. Используется в субтрактивной цветной фотографии.

*Цветокомпенсационные светофильтры* — светофильтры, подразделяемые на аддитивные светофильтры, выделяющие красный, зеленый и синий световые потоки, и субтрактивные светофильтры, выделяющие дополнительные цвета. Предназначены для компенсации аномальностей излучения источников света, изменений цветочувствительности фотоматериалов. Используются при фотосъемке и печати.

*Центральный (лепестковый) затвор* — затвор, устанавливаемый внутри объектива или рядом с ним и представляющий собой набор металлических лепестков, раскрывающихся от центра светового отверстия к его краям.

*Центры проявления* — группы из нескольких атомов серебра экспонированного зерна, на которых начинается превращение зерна в металлическое серебро в процессе проявления.

*Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ)* (функция передачи модуляции) — свойство фотопленки воспроизводить мелкие детали.

*Широкоугольный объектив* — объектив, фокусное расстояние которого меньше диагонали кадра. Обладает большим охватом съемочного пространства (более 60°) и заниженной глубиной резко изображаемого пространства.

*Штатив* — приспособление, фиксирующее положение фотоаппарата во время съемки.

*Шторный затвор* — затвор, у которого световые заслонки представляют собой две тканевые или металлические шторки. Устанавливается в фотокамере перед фокальной плоскостью объектива возле поверхности фотоматериала.

*Экспозиция* — количественная мера излучения, воздействующего на вещество за время освещения. Представляет собой общее количество света, падающее на пленку для образования скрытого изображения, т. е. равна произведению интенсивности падающего на пленку света на время, в течение которого она подвергается облучению. Интенсивность света регулируется величиной диафрагмы, а время — скоростью затвора (выдержкой).

*Экспонометр* — прибор, измеряющий яркость или освещенность объекта съемки с помощью фотоэлектрических приемников света — фотоэлементов или фоторезисторов, соединенных с индикаторами электрического тока.

*Экспонометр отраженного света* — экспонометр, измеряющий яркость света, отраженного предметом.

*Электронный импульсный осветитель* — импульсный источник света многоразового использования, принцип действия которого основан на электрическом разряде в инертном газе, находящемся под давлением в стеклянной колбе.

*Эффект Альберта* — эффект, позволяющий получить прямой позитив путем отбеливания экспонированного фотоматериала, предварительно засвеченному рассеянным светом.

*Эффект бахромы* (линий Маки) — частный случай пограничного эффекта проявления, заключающийся в понижении плотности покривания слабоэкспонированного участка на границе с сильноэкспонированным участком.

*Эффект Гершеля* — разрушение скрытого изображения, созданного в эмульсионном слое фотобумаги под действием неактиничного красного света.

*Эффект каймы* (бордюра) — частный случай пограничного эффекта проявления, заключающийся в увеличении оптической плотности сильноэкспонированного участка на границе со слабоэкспонированным участком.

*Эффект Костинского* (вертикальный эффект) — частный случай пограничного эффекта проявления, заключающийся в увеличении промежутка между двумя соседними

близкорасположенными экспонированными участками.

*Эффект прерывистого освещения* — один из примеров отклонения от закона взаимозаместимости, проявляющийся в том, что при одинаковых относительно длительных экспозициях фотоматериала непрерывным или прерывистым светом в первом случае почернение негатива будет менее плотным, чем во втором.

*Эффект Сабатье* — получение частичного обращения тонов фотоснимка путем равномерной засветки частично проявленного, но не отфиксированного отпечатка.<sup>1</sup>

*Эффект Эбергардта* — частный случай пограничного эффекта проявления, заключающийся в том, что плотность почернения небольших участков фотоэмulsionии возрастает с уменьшением площади участка при неизменной экспозиции.

*Эффективная чувствительность фотобумаги* — мера светочувствительности фотобумаги, используемая для определения ее оптимальной экспозиции.

*Эффективное время действия затвора* — время, в течение которого идеальный затвор фотокамеры открыт. (Идеальным называется затвор, который открывается и закрывается мгновенно.)

*Яркость (светимость)* — физическая величина, характеризующая световой поток, отраженный поверхностью.

## Оглавление

5 Предисловие редактора перевода

7 Предисловие

9 Часть 1. Предварительные сведения

9 Глава 1. История фотографии

9 Предшественники фотографии

11 Дагерротипия

14 Негативно-позитивный процесс

16 Стеклянные негативы

19 Негативы с сухим покрытием

20 Гибкая фотопленка и портативная фотокамера

20 Усовершенствование желатиновой эмульсии

21 История создания фотобумаги

23 Портативная фотография

25 Упражнения

26 Глава 2. Получение изображения

26 Фотокамера

29 Типы фотокамер

41 Закон взаимозаместимости

50 Определение экспозиции

54 Упражнения

56 Глава 3. Изобразительные средства фотографии

56 Что такое фотография?

65 Основные качества хорошей фотографии

66 Назначение снимка

68 Композиция

82 Фотопортрет

85 Модель и поза

88 Освещение модели при портретной съемке

92 Упражнения

93 Глава 4. Свет и оптические линзы

93 Свет

100 Тонкие линзы

106 Толстые линзы

109 Оптические системы

111 Аберрации и недостатки линз

118 Уменьшение аберраций объективов и искажений изо бражения 124 Упражнения

126 Глава 5. Применение оптики в фотографии

126 Увеличение

- 127 Угол поля изображения  
128 Угол поля зрения  
130 Равномерное освещение кадра  
132 Телеконвертер  
132 Макрофотография  
140 Бипризма Френеля  
140 Сохранение архитектурных пропорций  
142 Фотографирование объектов, не перпендикулярных оптической оси  
144 Восприятие перспективы  
148 Геометрическая трактовка глубины резко изображаемого пространства  
153 Математическая трактовка глубины резко изображаемого пространства  
156 Шкала глубины резко изображаемого пространства  
158 Глубина резкости  
159 Остановка движения  
161 КПД и эффективное время действия затвора  
164 Упражнения  
**166 Часть 3. Светочувствительные регистрирующие системы**  
**166 Глава 6. Зрение и другие светорегистрирующие процессы**  
166 Глаз  
173 Другие фотохимические регистрирующие процессы  
175 Электрофотографические процессы  
180 Сравнение светорегистрирующих систем  
182 Упражнения  
**183 Глава 7. Фотографический процесс**  
183 Строение фотоматериалов  
185 Основные принципы фотографического процесса  
187 Структура зерен AgX  
189 Образование скрытого изображения  
192 Проявители  
194 Проявление  
198 Обработка после проявления  
200 Стабилизация  
200 Метод обращения  
202 Диффузионно-фотографический процесс  
204 Упражнения  
**205 Глава 8. Сенситометрия**  
205 Воспроизведение тонов  
205 Интервал яркостей объекта съемки  
206 Регистрирующая способность фотобумаги  
206 Регистрирующая способность фотопленки  
207 Светорассеяние  
207 Экспозиция  
208 Логарифмическая природа зрительного восприятия  
209 Оптическая плотность  
211 Характеристическая кривая  
213 Средний градиент, гамма и показатель контрастности  
217 Светочувствительность фотопленок  
221 Контрастность фотографической бумаги  
222 Типы фотобумаг  
225 Роль фотоувеличителя  
227 Воспроизведение тонов  
230 Экспозиционные эффекты  
235 Зернистость фотоматериалов  
238 Воспроизведение деталей  
242 Частотно-контрастная характеристика  
244 Эффекты проявления  
246 Резкость снимка  
246 Упражнения

|   |
|---|
| <b>248 Глава 9. Определение экспозиции</b>  |
| 248 Методы измерений  |
| 249 Экспонометры  |
| 252 Определение экспозиции для объектов, обладающих средней отражательной способностью        |
| 255 Определение экспозиции при съемке объектов с малой или большой отражательной способностью |
| 260 Определение экспозиции для получения необычных фото снимков                               |
| 265 Зонная система  |
| 272 Упражнения  |
| <b>273 Часть 4. Свет, цвет и светофильтры</b>   |
| <b>273 Глава 10. Источники света в фотографии</b>   |
| 273 Спектральное распределение  |
| 273 Абсолютно черное тело как источник света  |
| 277 Люминесцентное освещение  |
| 277 Импульсные лампы  |
| 282 Электронные импульсные осветители   |
| 285 Применение импульсного освещения  |
| 295 Необычные условия освещения   |
| 297 Упражнения  |
| <b>299 Глава 11. Цвет</b>   |
| 299 Цветные объекты   |
| 303 Источники света и цвет  |
| 304 Восприятие цвета  |
| 305 Основные цвета  |
| 308 Системы классификации цветов  |
| 319 Упражнения  |
| <b>320 Глава 12. Цветная фотография</b>   |
| 320 Пути развития цветной фотографии  |
| 321 Субтрактивная цветная фотография  |
| 324 Современные цветные фотопленки и фотобумаги   |
| 328 Обращаемые фотопленки   |
| 332 Сравнительные характеристики фотопленок типа Ektachrome и Kodachrome                      |
| 336 Цветные негативные материалы  |
| 338 Искажения, вносимые красителями, и внутреннее маскирование                                |
| 342 Источники света для цветной фотографии  |
| 344 Определение экспозиции  |
| 346 Обработка цветных фотоматериалов  |
| 348 Хранение и использование пленок и снимков   |
| 349 Выбор фотопленки  |
| 352 Хромогенные фотопленки  |
| 353 Инфракрасная пленка   |
| 354 Одноступенный способ получения цветного изображения                                       |
| 359 Упражнения  |
| <b>360 Глава 13. Светофильтры</b>   |
| 360 Типы светофильтров  |
| 361 Светофильтры в фотографии   |
| 364 Компенсационные светофильтры  |
| 368 Контрастные светофильтры  |
| 368 Светофильтры, ослабляющие воздействие атмосферной дымки                                   |
| 371 Нейтрально-серые светофильтры   |
| 372 Поляризационные светофильтры  |
| 379 Светофильтры для специальных эффектов   |
| 381 Светофильтры для цветной фотографии   |
| 381 Конверсионные и коррекционные светофильтры  |
| 385 Цветокомпенсационные светофильтры   |
| 389 Светофильтры для фотолаборатории  |
| 391 Упражнения  |
| <b>393 Словарь терминов</b>   |
| <b>421 Предметный указатель</b>   |

Литература для фотолюбителей

Эрл Митчел

**Фотография**

Зав редакцией академик

В С Авдуевский

Зам зав редакцией

В И Пропон

Научный редактор

А Г Шемятенков

Младший научный редактор

Л В Тарасова

Художник

С М Гончаров

Художественный редактор

Н М Иванов

Технический редактор

И И Володина

Корректоры

В С Соколов М Е Савина

ИБ № 5935

Сдано в набор 19 02 87 Подписано к печати 18 02 88

Формат 70 х100V<sub>16</sub> Бумага мелован офсет Печать

офсетная Гарнитура таймс

Объем 13 25 бум л Усл.печ л 34 45 Усл.кр.отт

69 60 Уч изд.л 29 10

Изд № 7/4560 Тираж 100 000 экз Зак 965 Цена

4р 30 к

ИЗДАТЕЛЬСТВО МИР 129820 ГСП Москва И 110 1 и Рижский пер 2

Ордена Трудового Красного Знамени Калининский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома Государственного комитета СССР по делам издательств полиграфии и книжной торговли г Калинин пр Ленина 5

**Издательство «Мир»**

**выпускает в свет в 1988—1989 гг. книги**

**Киппартрик Д.**

Свет и освещение в фотографии: Пер. с англ. — 16 л., 4р. 30 к.

Книга посвящена основным приемам использования света в фотографии, рассмотрена технология управления освещением с использованием отражателей, рассеивателей и поглотителей света.

Представлены основные свойства света, его влияние на процесс фотосъемки. Наряду с традиционными способами освещения рассмотрены специальные эффекты: использование поляризованного света, применение многократных световых вспышек, создание цветовых эффектов и т. д. Книга прекрасно иллюстрирована.

Для фотолюбителей и фотографов-профессионалов.