

М. Н. ЦЫГАНОВ

О
С Н О В Ы
ФОТОГРАФИИ
И
АЭРОФОТОГРАФИИ



М. Н. ЦЫГАНОВ

ОСНОВЫ ФОТОГРАФИИ И АЭРОФОТОГРАФИИ

Издательство геодезической литературы
МОСКВА 1960

АННОТАЦИЯ

В книге «Основы фотографии и аэрофотографии» изложены сведения по оптике, основы сенситометрии, характеристики фотографических черно-белых и цветных материалов, сведения по наземной съемке, негативные и позитивные процессы для черно-белых и цветных материалов, задачи аэрофотосъемки и условия ее выполнения, процессы обработки черно-белых и цветных аэрофильмов.

Книга предназначена служить пособием для техников топографо-геодезических, геологических, аэрофотосъемочных экспедиций, а также для работников других специальностей, использующих фотографические методы для тех или иных технических целей.

Автор Михаил Николаевич Цыганов

Редактор К. И. Мархилевич
Редактор изд-ва Л. М. Комарькова

Техн. редактор В. В. Романова
Корректоры: В. А. Григорьева,
А. И. Смирнова

Г—12033
Печ. листов 17.

Подп. к печати 15/XI 1960 г.

Усл. печ. л. 23,3.

Тираж 6000 экз.

Формат бумаги 70×108¹/₁₆.

Зак. № 437.

Цена 10 р. 70 к. + переплет 1 р. 50 к.

Цена с 1/1 1961 г. 1 р. 22 к.

Рижская картфабрика, Б. Алтонавас, 43.

ВВЕДЕНИЕ

Фотографией называется наука, изучающая с теоретической и практической стороны всевозможные способы получения изображений объектов внешнего мира посредством действия света на светочувствительные материалы. При фотографической съемке посредством объектива на поверхности светочувствительного слоя пластинки или пленки получают оптическое изображение фотографируемого объекта. Пока объектив открыт и на поверхности светочувствительного слоя имеется оптическое изображение, свет действует на светочувствительные вещества слоя, вызывая в них некоторые химические изменения: происходит фотохимическая реакция. После съемки пластинку обрабатывают проявителем — раствором нескольких химических веществ; происходят дальнейшие химические реакции, и в результате получается фотографическое изображение.

Из изложения сущности фотографического процесса понятно, что фотография связана с наукой о свете — оптикой и с наукой о веществах и их превращениях — химией.

Оптика в применении к фотографии называется фотографической оптикой. Ее главная задача состоит в изучении и конструировании фотографических объективов. Кроме того, для фотографа, в частности для аэрофотографа, имеют значение многие другие связанные с оптикой вопросы, например источники освещения, оптические явления в атмосфере и др.

Химия в применении к фотографии называется фотографической химией. Фотографическая химия занимается изучением химических реакций, происходящих при фотографических процессах, и веществ, применяемых в фотографии.

Сведения по фотографической оптике и фотографической химии излагаются в различных главах этой книги.

Специальная глава посвящена сенситометрии, которая в настоящее время представляет обширный раздел фотографической науки. Основная задача сенситометрии заключается в разработке методов точного измерения свойств фотографических материалов и контроля фотографических процессов, а также количественной оценки качества фотографических изображений. Для специалистов в области технических и научных применений фотографии, в частности для специалистов по аэрофотографии, знание сенситометрии необходимо.

Для успешного изучения аэрофотографии необходимо предварительно хорошо усвоить общие основы фотографии. В данной книге достаточно подробно излагаются процессы химико-фотографической обработки светочувствительных материалов и характеристики этих материалов, а также приводятся краткие сведения по фотографическим эмульсиям и наземной фотографической съемке.

Последняя часть книги посвящена аэрофотографии: ее практическому применению, специфическим условиям фотографирования с воз-

духа и главным образом процессам химико-фотографической обработки черно-белых и цветных аэрофильмов.

Прежде чем переходить к изучению фотографии, необходимо составить общее представление о фотографическом процессе в целом.

Обычный фотографический процесс складывается из трех стадий: 1) фотографической съемки, 2) негативного процесса и 3) позитивного процесса.

Процесс фотографической съемки заключается в следующем. Фотоаппарат устанавливают против снимаемого объекта и получают резкое оптическое изображение в плоскости, соответствующей поверхности светочувствительного материала. В зависимости от конструкции фотоаппарата оптическое изображение получают вначале на матовом стекле путем изменения расстояния между объективом и матовым стеклом или же при помощи дальномера, или шкалы расстояний.

В процессе экспонирования изображение проецируется на поверхность светочувствительного слоя в течение определенного времени, которое называется выдержкой.

Выдержка осуществляется посредством затвора и обычно выражается долями секунды.

Светочувствительный слой, нанесенный на стеклянную пластинку или целлулоид, представляет собой тонкую желатиновую пленку, в которой находятся мельчайшие кристаллы бромистого серебра. Во время выдержки свет, действуя на галоидное серебро, образует в нем скрытое изображение. Оно состоит из мельчайших частичек (зародышей) металлического серебра, которое образуется в кристаллах галоидного серебра в результате разложения его светом.

Таким образом процесс фотографической съемки складывается из: 1) подготовительных операций (установка фотоаппарата и проч.), 2) наводки на резкость — получения резкого оптического изображения и 3) экспонирования — получения скрытого изображения.

Для того чтобы скрытое изображение сделать видимым, экспонированную фотопластинку или фотопленку подвергают обработке проявителем — раствором определенных химических веществ.

При этом процессе, называемом проявлением, под действием проявляющего раствора в тех местах, где образовались зародыши металлического серебра, происходит дальнейшее превращение галоидного серебра в металлическое. Чем сильнее подействовал свет на данный участок пластинки (т. е. чем ярче соответствующий участок сюжета), тем большее число зерен галоидного серебра будет содержать частицы скрытого изображения и будет проявлено под действием проявителя, следовательно, тем большее почернение получится на данном участке.

После проявления в светочувствительном слое, кроме металлического серебра, остается галоидное серебро, на которое свет при фотосъемке не подействовал. Его необходимо удалить, что и достигается в процессе фиксирования, во время которого галоидное серебро растворяется в фиксирующем растворе.

По окончании фиксирования фотопластинку или фотопленку с уже готовым серебряным изображением тщательно промывают, чтобы удалить растворенную в нем соль серебра и остаток фиксирующего раствора, а затем высушивают. Таким образом, негативный процесс состоит из: 1) проявления, 2) фиксирования и 3) дополнительных операций — промывки и сушки.

В результате негативного процесса получается негатив, т. е. обработанная пластинка или пленка с негативным изображением, которое отличается тем, что в нем яркие участки объекта получают темными (непрозрачными), а темные участки объекта — светлыми (прозрачными).

В этом смысле негативное изображение «обратно» по отношению к оригиналу. Темные участки негатива называются светом негатива (наиболее темные — сильными светом), а светлые — тенями негатива (наиболее светлые — глубокими тенями). Поскольку в обычных объектах съемки имеются всевозможные промежуточные яркости между наиболее яркими и наименее яркими участками, в негативе образуются различные полутона, т. е. почернения промежуточные между светом и тенями.

С полученного негатива делают позитивы на фотографической бумаге. Для этого в том или ином копировальном приборе фотобумага

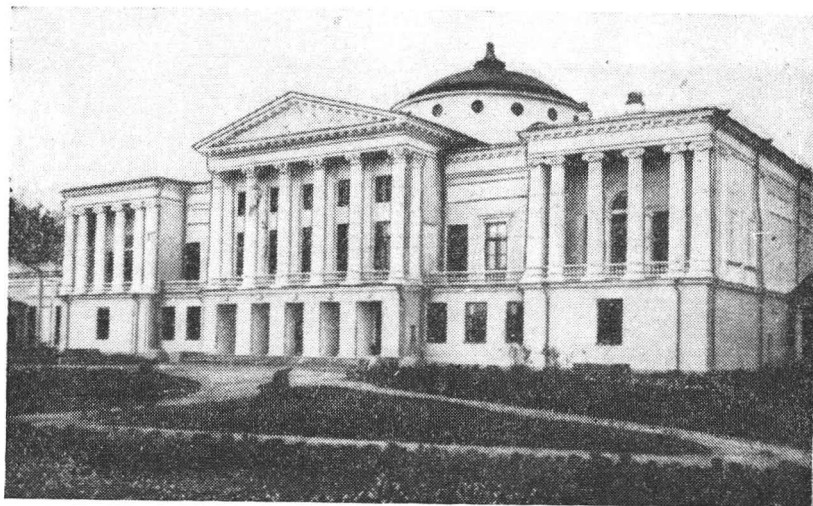
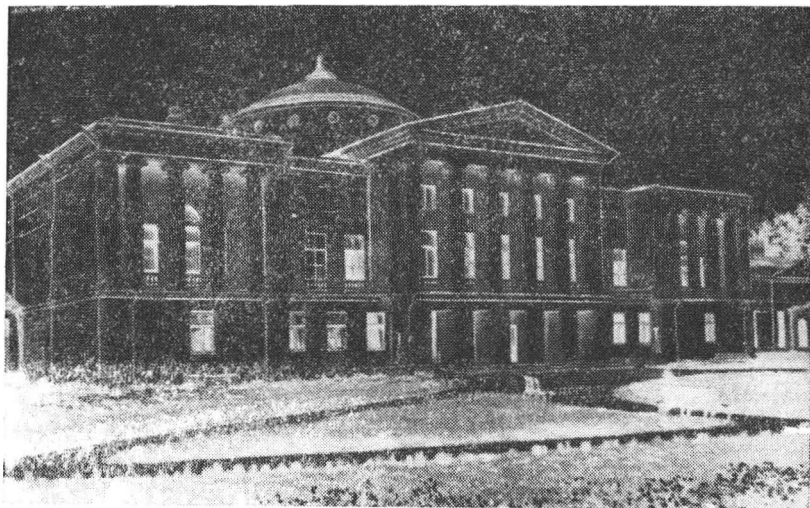


Рис. 1

подвергается действию света, проходящего через негатив. В результате на светочувствительном слое образуется скрытое изображение. В дальнейшем оно превращается в видимое совершенно так же, как и в негативном процессе. Позитивный процесс состоит из: 1) процесса печати с негатива — получения скрытого изображения в светочувствительном

слое фотобумаги, 2) проявления, 3) фиксирования и 4) дополнительных операций — промывки и сушки.

Позитив дает правильное воспроизведение объекта: яркие (светлые) части его выходят на позитиве светлыми, а темные — темными. Это происходит потому, что через темный участок негативного изображения, имеющий малую прозрачность, пройдет мало света, и, следовательно, в позитиве после проявления образуется слабое почернение и соответствующее место получится светлым, т. е. таким, каким оно является в действительности. Через прозрачный участок негатива свет подействует на фотобумагу сильнее, а в позитиве после проявления соответствующее место получится темным.

На рис. 1 приведен пример негативного и позитивного изображения.

Рассмотренный процесс является так называемым черно-белым процессом. В нем получаемое изображение состоит из участков с различной степенью почернения, но бесцветных.

Дадим понятие о цветном процессе. Для получения цветного изображения применяются специальные материалы: цветная пленка и цветная бумага. Светочувствительный слой цветного материала состоит из трех или двух других лежащих слоев. Светочувствительным веществом в цветном материале является, так же как в черно-белом, бромистое серебро, но, кроме того, в каждом из трех слоев содержится еще то или иное цветообразующее вещество, которое при процессе проявления дает краситель. По числу слоев получают три различных красителя. Сочетания этих красителей, количество которых в данном участке цветного материала зависит от полученной экспозиции, дают различные цвета. При этом в негативном изображении эти цвета не соответствуют цветам объекта съемки, в позитивном же изображении получают натуральные цвета сфотографированного объекта. Серебро изображения, а также оставшееся в слоях галлоидное серебро растворяется и в конечном счете получается изображение, состоящее только из красителей.

Глава I

СВЕДЕНИЯ ПО ОПТИКЕ

§ 1. Природа света. Законы его распространения и цвета тел

Свет представляет собою распространяющиеся от того или иного источника электромагнитные волны, подобные радиоволнам, но отличающиеся от них очень малой длиной.

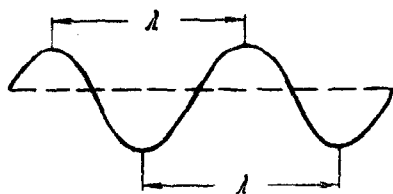


Рис. 2

Длина световых волн (рис. 2) обыкновенно выражается в миллимикронах ($m\mu$), т. е. в тысячных долях микрона (1 микрон = 0,001 мм), а иногда в ангстремах $\text{\AA}$. Ангстрем составляет $\frac{1}{10}$ миллимикрона.

Свет распространяется в воздухе со скоростью $c = 300\,000\text{ км/сек.}$

Если разделить величину скорости света c , т. е. то расстояние, которое проходит свет в одну секунду, на величину длины волны λ , то получим число волн, приходящихся на это расстояние (ν).

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Величина ν называется частотой.

Таким образом, характерными физическими признаками световых излучений при постоянной величине скорости распространения света являются длина волны λ и частота колебаний ν .

Белый (бесцветный) солнечный свет состоит из бесчисленного множества различных цветных лучей, совместное действие которых на глаза

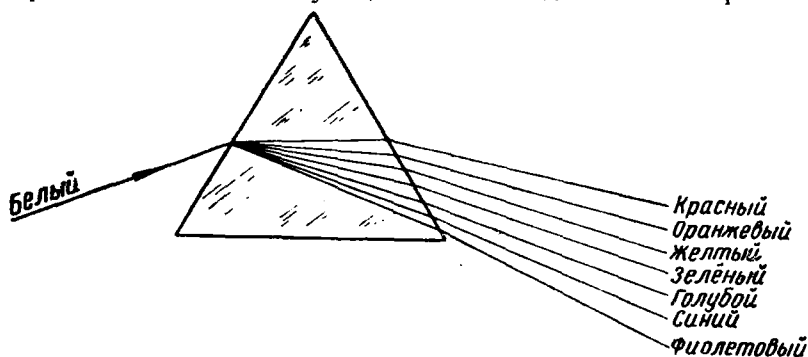


Рис. 3

вызывает ощущение белого цвета. Сложный состав белого света доказывается известным опытом с призмой (рис. 3). Проходя через призму, белый луч света разлагается в спектр, в котором наблюдаются цвета:

Цвета	Длины волн
Фиолетовые	400 - 430 м
Синие	430 - 470 "
Голубые	470 - 490 "
Зеленые	490 - 550 "
Желтые	550 - 590 "
Оранжевые	590 - 620 "
Красные	620 - 760 "

Рис. 4

фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. За красным концом спектра доказано наличие невидимых инфракрасных лучей, за фиолетовым — невидимых ультрафиолетовых. Цвет световых лучей связан с длиной их волны. Соотношение между цветами спектра и длиной волны поясняется рис. 4.

Свет называется монохроматическим, если он представляет колебание с одной длиной волны или с очень узким диапазоном длин волн.

Напомним основные законы распространения света.

1. В однородной среде свет распространяется прямолинейно.

2. Закон отражения света. Падающий и отраженный лучи находятся в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным в точке падения к поверхности, на которую падает луч. Угол падения равен углу отражения (рис. 5). Если поверхность тела шероховатая, то падающие лучи встречаются различными углами и отраженные лучи идут по различным направлениям. В этом случае получается диффузное рассеяние света.

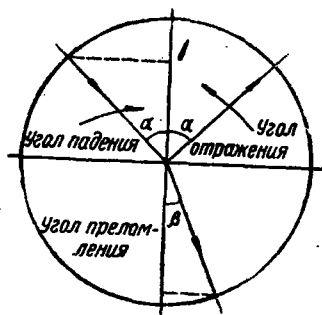


Рис. 5

3. Закон преломления света (рис. 5). Луч падающий и луч преломленный находятся в одной плоскости с перпендикуляром падения. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Она называется показателем преломления.

Различают два случая преломления света. Когда луч света проходит из среды менее плотной, например из воздуха, в среду более плотную, например в стекло, то преломленный луч приближается к перпендикуляру падения; при переходе из более плотной среды в менее плотную луч удаляется от перпендикуляра падения.

В этом последнем случае может наблюдаться явление полного внутреннего отражения.

Вследствие того, что с увеличением угла падения угол преломления увеличивается (лучи SAA' и SBB' на рис. 6), наступает такой момент, когда (при определенном угле падения) преломленный луч скользит по поверхности среды. Если же еще более увеличить угол падения, то происходит явление полного внутреннего отражения. Оно состоит в том (рис. 6), что луч SF полностью отражается от поверхности по закону отражения. Угол падения луча, при котором имеет место это явление, называется углом полного внутреннего отражения. Лучи, падающие под большими углами, также полностью отражаются.

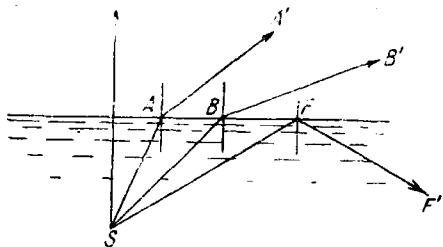


Рис. 6

Все тела по отношению к испускаемому ими свету разделяются на самосветящиеся — источники света

и тела, отражающие падающий на них свет от того или иного источника. Свет, падающий на прозрачные тела, делится на три части: свет, отраженный от поверхности, свет, поглощенный телом, и свет, пропущенный телом. В случае непрозрачного тела пропущенного света нет.

Свет, отраженный от поверхности тела, всегда имеет тот же самый состав, что и падающий свет, например при освещении белым светом отраженный свет также является белым.

Если прозрачное тело пропускает белый свет равномерно по отношению ко всем лучам спектра, то говорят, что оно обладает неизбирательным поглощением. В противном случае поглощение является избирательным. Стекло, окрашенное в тот или иной цвет, т. е. пропускающее белый свет избирательно, широко применяются в фотографии для лабораторного освещения, при фотографической съемке, при печати с цветных негативов и для других целей. Они называются светофильтрами. Широко используются также пластинки и пленки с неизбирательным пропусканием; они на вид — нейтрально серые; применяя такие пластинки и пленки различной прозрачности, можно точно регулировать интенсивность освещения, получаемого от какого-либо источника. Каждый светофильтр количественно характеризуется степенью пропускания им различных длин волн.

Цвет тела, рассматриваемого на отражение, определяется отраженным от поверхности белым светом и светом, отраженным от внутренних частиц тела; спектральный состав этого последнего определяется тем, какие лучи поглощаются телом.

При изменении спектрального состава света, падающего на тела, будет, естественно, изменяться и отраженный ими свет, а следовательно, и окраска тела. Так, например, при заходящем солнце ландшафт приобретает красноватый оттенок; при свете электрических ламп накаливания, в которых преобладают длинноволновые желтые, оранжевые и красные лучи, синие тела теряют насыщенность, темно-синие чернеют, голубые зеленеют, желтые становятся более светлыми.

Изменение цвета предметов при различных источниках света имеет большое значение при цветном фотографировании и при визуальной оценке пробных и окончательных цветных фотографических отпечатков.

§ 2. Основные фотометрические понятия

Сила света и световой поток

Представим себе полый непрозрачный шар, в центре которого находится светящаяся точка (рис. 7). Пусть какой-нибудь из радиусов шара движется таким образом, что в результате движения он описывает некоторую замкнутую поверхность, например коническую. В пересечении ее с поверхностью шара на этой последней будет вырезана некоторая площадь. Пространство, ограниченное этой конической поверхностью, называется пространственным, или телесным, углом.

За единицу телесного угла принимается стерadian — такой телесный угол, который вырезает на шаровой поверхности площадь, равную квадрату радиуса шара. Любой телесный угол может быть выражен в стерadianах. Все пространство, отвечающее полной поверхности шара, равной $4\pi r^2$, выразится в стерadianах отношением

$$\frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi = 12,56 \text{ стерadiana}.$$

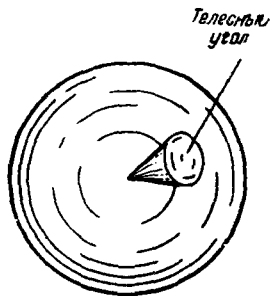


Рис. 7

За единицу силы света принимается сила света эталонированной электрической лампочки, горящей при определенном напряжении. Эта единица, принятая в ряде стран, называется международной свечой. Точечный источник света силой в одну международную свечу создает в телесном угле величиной в 1 стерadian световой поток, равный 1 люмену (лм).

Если обозначим через F световой поток, идущий в пределах телесного угла, равного n стерadianов, то сила света выразится формулой

$$I = \frac{F}{n}.$$

показывающей, что сила света выражается световым потоком, который приходится на 1 стерadian.

Освещенность. Когда световой поток падает на какую-нибудь поверхность, он освещает ее более или менее сильно в зависимости от величины потока и величины той площади, по которой он равномерно распределен. Освещенностью E поверхности называется отношение светового потока F , падающего равномерно на какую-нибудь поверхность, к величине этой поверхности S

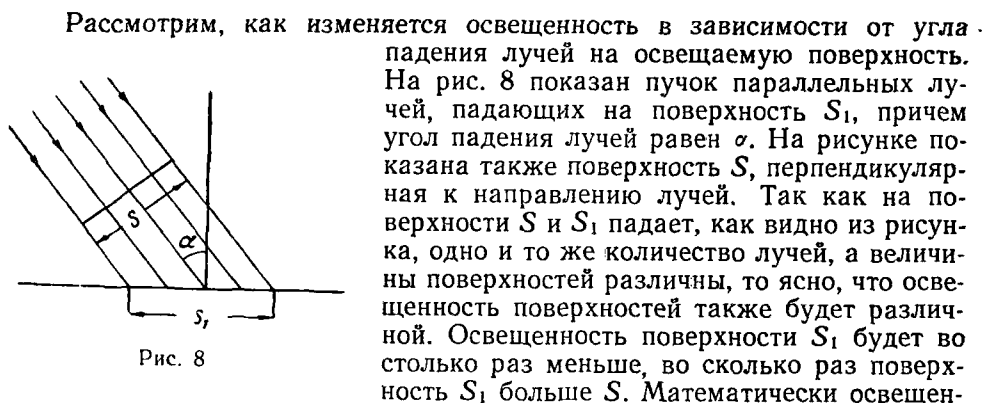
$$E = \frac{F}{S}.$$

Единицей освещенности является люкс (лк); люкс — это освещенность, создаваемая световым потоком в 1 лм на площади в 1 м² (10 000 лк составляют единицу освещенности, называемую фотом (ф)).

Освещенность часто выражают в зависимости не от светового потока, а от силы света. Представим себе в центре шара точечный источник света силой в 1 свечу, причем радиус шара равен 1 м. Представим себе также телесный угол в 1 стерадиан. Вырезаемая им на поверхности шара площадь, равная квадрату радиуса, будет равна 1 м². Световой поток будет, очевидно, равен 1 лм, а освещенность будет равна 1 лк. Следовательно, 1 лк — это та освещенность, которая создается точечным источником света силой в 1 свечу на поверхности, отстоящей от источника света на расстоянии 1 м. Поэтому за единицу освещенности можно принять также единицу, называемую свеча-метр, которая равна 1 лк. Приведем примеры освещенностей, наблюдаемых при различных условиях, а также требуемых в различных случаях (табл. 1).

Таблица 1

Наблюдаемая освещенность	Люкс
В яркий солнечный день на открытом месте	70 000—100 000
В пасмурный день на открытом месте	500— 1 500
В светлой комнате	100— 1 000
На рабочем столе	50— 250
Достаточная для чтения	20
Достаточная для ориентировки	1
При полном лунном свете	0,2



Рассмотрим, как изменяется освещенность в зависимости от угла падения лучей на освещаемую поверхность. На рис. 8 показан пучок параллельных лучей, падающих на поверхность S_1 , причем угол падения лучей равен α . На рисунке показана также поверхность S , перпендикулярная к направлению лучей. Так как на поверхности S и S_1 падает, как видно из рисунка, одно и то же количество лучей, а величины поверхностей различны, то ясно, что освещенность поверхностей также будет различной. Освещенность поверхности S_1 будет во столько раз меньше, во сколько раз поверхность S_1 больше S . Математически освещенность E поверхности S_1 выразится, в зависимости от угла падения лучей, формулой

$$E_1 = E \cos \alpha,$$

где E — освещенность поверхности S .

Например, если ось пучка составляет с нормалью к освещаемой площади угол 45° , освещенность падает до 0,7 своего максимального значения, для угла 60° освещенность составляет 0,5 максимального значения.

Яркость. Яркость какого-либо освещенного предмета зависит от его освещенности и, кроме того, от его способности отражать падающий на него свет. Яркость самосветящихся тел — источников света — зависит от их силы света. Единица яркости называется стильбом. Стьюб (сб) представляет собой яркость равномерно светящейся поверхности в перпендикулярном к ней направлении, испускающей в этом направлении свет силой в 1 св с площади в 1 см².

Яркость, обозначаемая буквой B , выражается в стильбах формулой

$$B = \frac{I}{S},$$

где I — сила света в свечах, S — площадь в квадратных сантиметрах.

Яркость, в 1000 раз большая стильба, называется килостильбом (кстб), в 1000 раз меньшая стильба — миллистильбом (мстб), а яркость в одну десятую миллистильба — децимиллистильбом (дмстб).

Приборы, предназначенные для измерения силы света источника, называются фотометрами. Фотометрические измерения разделяются на два вида: объективные и субъективные, или визуальные.

Объективные измерения выполняются при помощи приборов, позволяющих проводить измерения без участия глаза. Субъективные или визуальные измерения выполняются непосредственно глазом.

Объективные фотометры состоят из фотоэлемента и электроизмерительного прибора. Свет, падающий на фотоэлемент, вызывает появление электрического тока, сила которого показывается шкалой, соединенной последовательно с фотоэлементом электроизмерительного прибора. Шкала этого прибора может быть градуирована в световых единицах, например в люксах.

Фотометры, шкала которых градуирована в значениях освещенности, называется люксметрами.

Визуальные фотометры построены на следующем принципе. В поле зрения окуляра фотометра видны две соприкасающиеся поверхности. Яркость одной из них пропорциональна интенсивности измеряемого света, а яркость другой пропорциональна интенсивности сравнительного света. При измерении освещенности яркости этих двух световых полей уравниваются.

§ 3. Основные сведения по цветоведению

Все цвета разделяются на ахроматические и хроматические. Белые, серые всех оттенков и черные цвета называются ахроматическими (некрасочными). Ахроматические цвета можно расположить в виде шкалы, начинающейся с белого цвета и кончающейся черным. В этой шкале цвета отличаются друг от друга по светлоте: ахроматический цвет имеет тем большую светлоту, чем ближе он к белому. Хроматическими цветами называются цвета, имеющие, в отличие от ахроматических, цветовой тон. Под цветовым тоном понимается тот признак, по которому данный цвет может быть отнесен к тому или иному цвету в спектре. Хроматические цвета характеризуются, кроме их цветового тона, светлотой и насыщенностью. Светлота хроматического цвета определяется соответствием его по зрительному впечатлению некоторому серому цвету. Если взять шкалу серых ахроматических цветов от белого до черного и какой-либо окрашенный предмет, например лист зеленой бумаги, то, сравнивая последний с различными полями серой шкалы, можно подобрать к данному хроматическому цвету ахроматический цвет, имеющий такую же светлоту (яркость). Светлота цвета меняется в зависимости от интенсивности освещения предмета. Она тем больше, чем сильнее освещена.

Насыщенность есть степень заметности цветового тона, или, иначе говоря, степень отличия хроматического цвета от одинакового с ним по светлоте серого цвета. Два хроматических цвета могут иметь одинаковый цве-

товой тон и одинаковую светлоту, но отличаться степенью насыщенности, например цвет апельсина насыщеннее цвета песка, цвет кумача насыщеннее цвета кирпича и т. п. Насыщенность определяется примесью белого света. Чем больше примесь белого света, тем менее насыщенным является данный цвет. Самыми насыщенными являются цвета спектра — в них отсутствует примесь белого света.

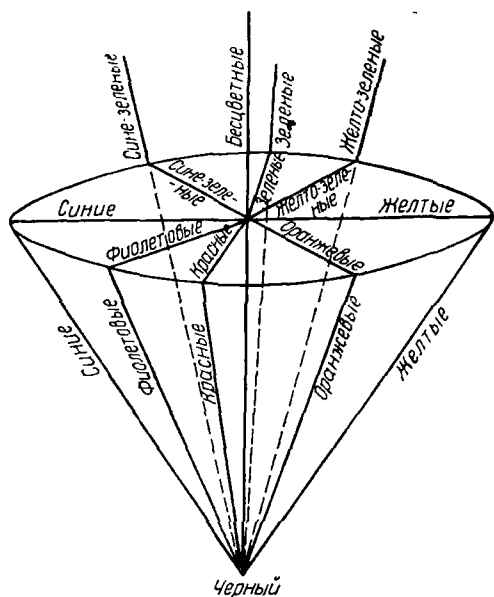


Рис. 9

Совокупность цветов по признакам цветового тона, светлоты и насыщенности можно представить графически в виде цветового конуса, показанного на рис. 9.

Цветовые тона образуют основание этого конуса — цветовой круг, изображенный отдельно на рис. 10. На цветовом круге цвета располагаются в таком же порядке, как в спектре. Вершина конуса соответствует черному цвету, а центр основания конуса — белому. Ось конуса называется ахроматической осью.

Возьмем какую-нибудь точку на окружности цветового конуса, например точку, соответствующую красному цвету. Эта точка характеризуется тремя координатами, а именно: 1) положение ее на окружности определяет цветовой тон, 2) расстояние ее от вершины определяет светлоту, 3) расстояние ее от центра основания определяет насыщенность. Если выбранная точка приближается к центру, то насыщенность цвета уменьшается, а если точка попадает в центр, насыщенность станет равной нулю (белый свет). Если точка движется по образующей конуса, то уменьшается светлота цвета и в вершине получается черный цвет. Концентрические окружности основания конуса (или любого поперечного сечения) дают цвета различной насыщенности.

Таким образом, цветовой конус дает очень наглядное представление о всей совокупности цветов с различным цветовым тоном, светлотой и насыщенностью.

Сложением цветов называется процесс, при котором два или несколько цветов воспринимаются сетчаткой глаза одновременно или же действуют на глаз последовательно при быстрой поочередной смене, так что впечатление от восприятия отдельных цветов сливается; в результате получается некоторый суммарный цвет.

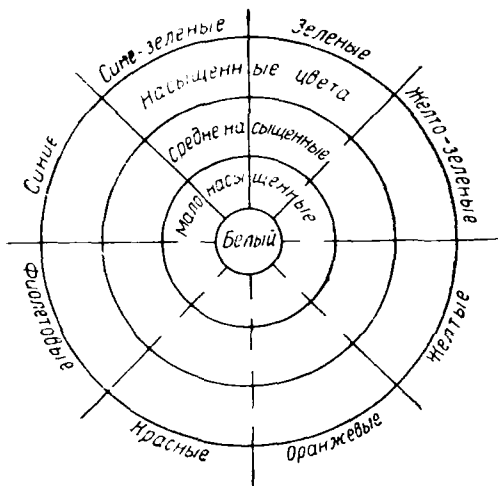


Рис. 10

Сложение цветов легко осуществить, направляя на белый экран два или несколько потоков цветных лучей, полученных, например, от электроламп накаливания путем пропускания света через различные, расположенные перед лампами светофильтры. Еще проще осуществить сложение цветов отраженных световых потоков, пользуясь волчком (юлой) или дисковой вертушкой, на поверхность которых нанесены различные цвета в виде секторов различных угловых размеров (рис. 11).

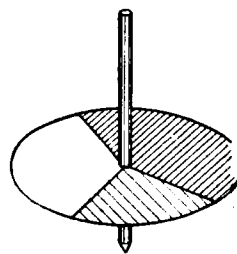


Рис. 11

Если вертушка вращается с достаточной скоростью, то, меняя размеры секторов и их исходные цвета, можно получить различные цвета.

Существуют пары отдельных спектральных цветов, дающих при сложении белый. Такие цвета называются **дополнительными**. Примером дополнительных цветов являются красный и голубовато-зеленый, синий и желтый. Для лучей зеленой зоны спектра нет монохроматических дополнительных лучей. Дополнительным цветом к зеленому является пурпурный, возникающий в результате смешения красных и синих лучей спектра. Чтобы получить белый цвет, смешиваемые монохроматические лучи должны иметь определенные длины волн, например: красный — 656 м μ и дополнительный к красному голубовато-зеленый — 492 м μ .

Смешав два дополнительных цвета, а именно, взяв какой-нибудь цвет и прибавив к нему другой, дополнительный, сначала в небольших, а затем все в больших количествах, получим цвета того же тона, который имел первый из них, но более бледные, т. е. менее насыщенные. При определенных соотношениях дополнительных цветов получим белый цвет. При дальнейшем увеличении второго составляющего цвета будет образовываться оттенок цветового тона, присущий второму цвету. Чем больше будем прибавлять второго цвета, тем больше получаемый цвет будет отличаться от белого, т. е. будет возрастать его насыщенность.

Если смешивать два каких-либо цвета, не являющихся дополнительными, то белого цвета не получится. Так, например, смесь красного с желтым дает оранжевый цвет, смесь синего с зеленым — голубой. При добавлении второго цвета к первому цветовой тон смеси будет постепенно изменяться — сдвигаться от цветового тона первого к цветовому тону второго.

Сложение цветов можно представить также в графической форме, расположив все спектральные цвета по кругу, включая в этот круг и пурпурный цвет, отсутствующий в спектре (рис. 12). Цвета с определенной длиной волны наносят на окружности круга таким образом, чтобы дополнительные цвета находились один против другого. Белый цвет изобразится центром круга, так как в нем пересекаются все диаметры, концы которых попарно соответствуют дополнительным цветам.

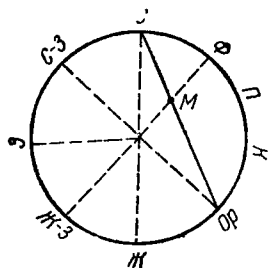


Рис. 12

Возьмем теперь два недополнительных цвета (синий и оранжевый) и соединим их прямой. Если эту прямую разделить точкой *М* на две части так, чтобы величины полученных отрезков соответствовали относительным количествам взятых для смешивания цветов, и если через центр круга и точку *М* провести радиус, то он пересечет окружность в точке *Ф*, которая укажет цветовой тон смешанного цвета. Расстояние точки *М* от центра, разделяющей линию в нужном

отношении, характеризует насыщенность смешанного цвета. Чем дальше один от другого находятся два смешиваемых цвета, тем большее количество различных цветных оттенков может быть получено при различном соотношении смешиваемых цветов, но тем бледнее, т. е. менее насыщенными, они будут.

Получить всевозможные цветовые тона из двух спектральных цветов нельзя. Для этого необходимо взять три спектральных цвета: синий, зеленый и красный. Эти цвета называются основными, или первичными.

Смешивая красный цвет с зеленым, можно получить различные тона, лежащие между ними, т. е. оранжевые, желтые и желто-зеленые различных оттенков. Смешение зеленого и синего цветов дает голубые цвета различных оттенков, а смешение синего и красного — пурпурные тона.

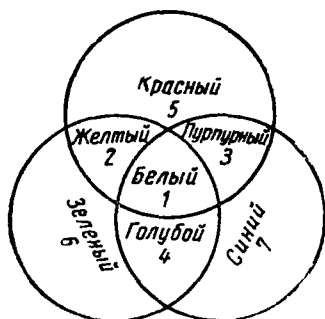


Рис. 13

Таким образом, имея три основных цвета и смешивая их попарно, можно получить все цветовые тона. Смешением трех основных цветов в равном соотношении можно получить белый. Действительно, можно смешать зеленый и красный цвета таким образом, что получится желтый цвет, дополнительный к взятому синему; смешивая образованный желтый с синим цветом, получим белый.

В качестве примера (рис. 13) приведена схема сложения трех световых потоков, окрашенных в красный, зеленый и синий цвета.

Эти три цвета, представленные в виде трех окружностей, на площади 1 перекроют друг друга и дадут при правильно выбранном соотношении белый цвет. Участок 2 окажется окрашенным в смесь красного и зеленого, т. е. в желтый цвет; участок 3 — в смесь красного и синего, т. е. пурпурный цвет; участок 4 будет иметь голубой цвет, полученный от сложения синего и зеленого световых потоков.

Участки 5, 6 и 7, где не происходило смешения цветов, сохраняют исходные красный, зеленый и синий цвета.

Способ образования цвета, основанный на сложении цветов окрашенных световых потоков, называется аддитивным (или слагательным).

Сущность этого способа (рис. 14) состоит в том, что на экран через светофильтры (красный, зеленый и синий) проецируют три позитивных изображения, отпечатанных с негативов, полученных при съемке объекта через те же светофильтры.

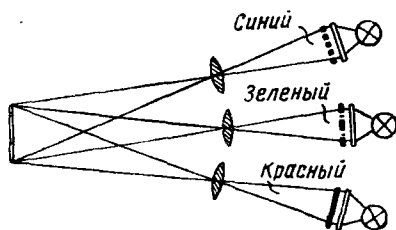


Рис. 14

Второй способ получения различных цветов — субтрактивный (вычитательный) — состоит в том, что желаемый цвет получается из белого светового потока путем поглощения (вычитания) некоторых лучей при помощи селективно поглощающих светофильтров, которые ставятся на пути потока белого света.

Для субтрактивного образования цветов необходимы светофильтры:

- 1) желтый, который поглощает синие лучи и пропускает свет зеленой и красной зон спектра (прозрачен для лучей с длиной волны от 500 до 700 мμ);

- 2) пурпурный, поглощающий зеленые лучи и пропускающий лучи

синей и красной зон спектра (прозрачен для лучей с длиной волны 400—500 мμ и 600—700 мμ);

3) голубой, поглощающий красные лучи и пропускающий лучи синей и зеленой зон спектра (прозрачен для лучей с длиной волны от 400 до 600 мμ).

На рис. 15 схематически показано образование зеленого цвета субтрактивным способом при последовательном прохождении белого света через желтый и голубой светофильтры, расположенные один за другим.

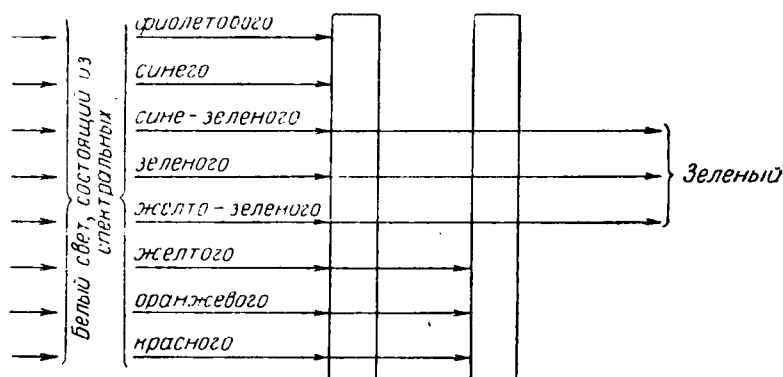


Рис. 15

При попарном применении эти субтрактивные светофильтры (желтый, пурпурный и голубой), т. е. поглощающие каждый одну треть спектра, дают основные цвета — синий, зеленый и красный:

белый минус (голубой + пурпурный) = синий,
 белый минус (голубой + желтый) = зеленый,
 белый минус (пурпурный + желтый) = красный.

Изменяя прозрачность субтрактивных светофильтров, можно получить разнообразные оттенки синего, зеленого и красного цветов. Если на пути потока белого света поставить все три светофильтра (желтый, пурпурный и голубой), то они поглотят последовательно все лучи, входящие в состав белого света, и получится черный цвет. Если брать наборы светофильтров различной степени плотности, можно получить серые тона различной степени светлоты.

Современные способы цветной фотографии основаны на субтрактивном принципе образования цветов.

В заключение приводим краткие сведения о восприятии цветов. Глаз может различать в солнечном спектре около 150, а включая пурпурные цвета, — до 180 цветов. Количество цветов, наблюдаемых в природе, т. е. отличающихся друг от друга по цветовому тону, светлоте и насыщенности, достигает приблизительно 13 000.

Что касается спектральной чувствительности глаза, то максимум ее находится в желтой части спектра, при $\lambda = 555$ мμ.

Восприятие цвета данного предмета зависит от цвета одновременно или последовательно наблюдаемых других цветов. Это явление называется цветовым контрастом. Примеры цветового контраста: кусочки одной и той же серой бумаги кажутся на черном фоне светлее, чем на белом; серая бумага на красном фоне приобретает зеленоватый оттенок; после длительного рассматривания зеленого абажура лампы белая бумага приобретает красноватый оттенок.

Явления, связанные с восприятием цветов, объясняются теорией цветового зрения, которое рассматривается в цветоведении.

§ 4. Законы температурного лучеиспускания

Цветовая температура

Известно, что при нагревании какого-либо твердого тела спектральный состав излучения постепенно изменяется: сначала увеличивается испускание невидимых тепловых лучей; при дальнейшем повышении температуры тело начинает испускать темно-красные лучи, затем красные, оранжевые, а потом и другие более коротковолновые лучи и притом все в большей степени. В результате этого свечение из красного становится вначале оранжевым, потом желтым и, наконец, белым — при температуре белого каления, причем одновременно увеличивается общая яркость свечения.

Температурное лучеиспускание зависит не только от температуры тела, но и от его физических свойств. Если внести в пламя газовой горелки кусочек угля и кусочек мела, то оказывается, что, хотя эти два тела будут нагреты до одной и той же температуры, светиться они будут по-разному, а именно: уголь гораздо ярче, чем мел. Установлено, что чем больше тело поглощает падающих на него лучей, тем больше оно испускает лучей при нагревании. Наибольшей поглощательной способностью обладают черные тела. Тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию и обладает одновременно максимальной способностью к излучению, называют **абсолютно черным телом**.

Естественных абсолютно черных тел в природе не существует, но такое тело можно искусственно создать в виде полого шара с внутренней вычерненной поверхностью, изготовленного из тугоплавкого металла и имеющего небольшое отверстие. Как видно из рис. 16, лучи, входящие через отверстие внутрь шара, в значительной степени поглощаясь черной поверхностью, частично отражаются от нее; отраженные лучи, встречая зачерненную поверхность, снова большей частью поглощаются; отражается от внутренней поверхности уже очень малая доля света. После ряда последовательных отражений свет будет практически полностью поглощен.

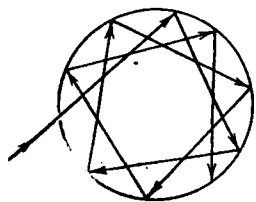


Рис. 16

Таким образом, отверстие полого шара и является абсолютно черным телом, так как все лучи, войдя в шар, поглощаются его внутренними стенками. При нагревании такого шара внутренняя его поверхность будет излучать свет в зависимости от температуры нагревания; отверстие светится сначала темно-красным излучением, затем желтым и, наконец, белым светом.

Таким образом, с изменением температуры нагревания абсолютно черного тела изменяется спектральный состав его излучения. Излучательная способность абсолютно черного тела является максимальной по сравнению с излучательной способностью любых тел при той же температуре и всегда качественно и количественно одинаковой при постоянстве температуры излучателя.

При определении связи между температурным лучеиспусканием и температурой в отношении абсолютно черного тела были установлены законы температурного лучеиспускания, сущность которых состоит в следующем.

Полная энергия лучеиспускания абсолютно черного тела E пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры этого тела

$$E = \sigma \cdot T^4,$$

где T — абсолютная температура такого тела (т. е. температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, соответствующего -273° по шкале Цельсия); шкала абсолютной температуры обозначается буквой К;