

МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕНСИТОМЕТРИИ

Ю. Н. Гороховский, Ленинград

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее существенных черт современного прогресса фотографии является почти полное вытеснение чистых бромосеребряных эмульсий, чувствительных лишь к сине-фиолетовой и к части ультрафиолетовой области спектра (собственная чувствительность бромистого серебра фотографической эмульсии), эмульсиями, чувствительность которых распространяется и на другие части спектра, включая инфракрасную его часть. Этот прогресс был достигнут благодаря успехам сенсibilизации—сообщению фотографической эмульсии добавочной чувствительности посредством адсорбции на бромистом (или, вообще, галоидном) серебре различных красителей (сенсibilизаторов). Следует при этом заметить, что действие сенсibilизатора не ограничивается созданием некоторой добавочной области чувствительности, но часто приводит также к повышению обычной „синей“ чувствительности.

Современный ассортимент высокочувствительных фотографических материалов состоит почти исключительно из материалов, сенсibilизированных к той или иной части спектра, и несенсibilизированные материалы применяются лишь в специальных случаях. Слои, обладающие добавочной чувствительностью к желто-зеленым лучам (520—580 $\text{m}\mu$), называются ортохроматическими, чувствительные к желто-красным лучам (до $\lambda = 680 \text{ m}\mu$) называются панхроматическими, наконец, чувствительные к инфракрасным лучам (730—1200 $\text{m}\mu$),—инфракрасными.

Расширение спектрального диапазона фотографической чувствительности дает возможность приблизиться к разрешению двух важнейших проблем:

- 1) получение правильной цветопередачи, т. е. получение на черно-белом снимке градации тонов, соответствующей визуальным яркостям различных частей снимаемого разноцветного объекта;
- 2) увеличение видимости—фотографирование объекта в лучах, к которым человеческий глаз чувствителен мало или нечувствителен вовсе.

Параллельно указанной выше эволюции фотохимической технологии, естественно, эволюционировала и сенситометрия—учение о количественном определении светочувствительности. С одной стороны, значительно повысились требования к источнику света при сенситометрическом испытании—к спектральному составу света, излучаемого источником, и к его постоянству. Место свечи Гейфнера заняла электрическая лампа накаливания с известной цветовой температурой, а Дэвисом и Гибсоном¹ была разработана серия жидких светофильтров, устанавливаемых перед источником света с любой цветовой температурой и приводящих спектральное распределение энергии, падающей на пластинку, к распределению энергии в полуденном дневном свете (так называемые фильтры дневного света).

С другой стороны, стала развиваться особая отрасль сенситометрии—спектральная или цветовая сенситометрия, т. е. учение об определении чувствительности к свету более или менее узкого спектрального состава. В зависимости от того, определяют ли чувствительность к монохроматическому излучению или к полихромному свету („цвету“), следует различать собственно спектральную и собственно цветовую сенситометрию (Spektralsensitometrie и Farbensensitometrie). Так как понятие „цвет“ с точки

зрения спектральной достаточно условно, то очевидно, что определение спектральной чувствительности (иногда ее называют монохроматической чувствительностью) должно быть и по принципиальным и по методическим соображениям предпочтено определению цветоувствительности, тем более, что никакое другое определение не имеет смысла в невидимых частях спектра (ультрафиолетовом и инфракрасном свете). Однако сложность и неувязочность законов совместного действия света различных длин волн на фотографический слой (правило аддитивности)* делает для практических целей в некоторых случаях желательным определение и цветоувствительности.

Настоящая статья имеет целью рассмотрение существующих методов спектральной сенситометрии. Однако этому приходится предпослать краткий обзор основ цветовой сенситометрии, что должно пояснить преимущества и необходимость разработки именно метода спектральной сенситометрии, несмотря на его относительную сложность и меньшую „практичность“ сравнительно с цветовой сенситометрией.

§ 2. ЦВЕТОВАЯ СЕНСИТОМЕТРИЯ

Определение цветоувствительности может быть произведено двояко: либо по методу светофильтров, либо по методу цветowych таблиц.

Метод светофильтров заключается в следующем. Перед фотографическим слоем ставится нейтрально-серый клин, т. е. светофильтр, у которого в пределах в видимой части спектра поглощение не имеет селективного характера и оптическая плотность которого равномерно меняется в одном направлении, а на клин накладываются полосы цветных светофильтров, пропускающих более или менее круто вырезанную часть спектра. Слой экспонируется перед некоторым стандартным источником света и проливается (в строго определенных условиях, конечно). На фотографическом слое получаются полосы с оптическими плотностями, убывающими от одного конца полосы к другому и достигающими нуля при некоторой определенной плотности серого клина. Численно цветоувствительность выражается различно, если пользоваться в качестве нейтрально-серого клина клиновым сенситометром Эдер-Гехта, то чувствительность к красному, желтому, зеленому и синему цветам выражается в градусах Эдер-Гехта (по порогу, т. е. по минимальной плотности почернения над вуалью), если же пользоваться ступенчатым клином для сенситометрии по системе DIN (германский промышленный сенситометрический стандарт), то чувствительность выражается в градусах DIN (порядковый номер ступени клина, под которым на слое при экспозиции $\frac{1}{20}$ секунды получается плотность около 0,1 над вуалью⁴).

Для этого последнего случая Эггерт⁵ предлагает пользоваться желтым фильтром Лютера, отрезающим всю область спектра, отвечающую собственной чувствительности эмульсии (до $\lambda = 490$ м μ): разность между чувствительностью без фильтра и чувствительностью под фильтром (так называемая Gelbdifferenz) тем меньше, чем выше степень сенсibilизации. Эггерт разделяет фотографические слои по величине этой разности на 3 группы,

если разность (в $\frac{1}{10}$ DIN) составляет $\begin{cases} \sim 9 \text{ то слой слабоортохроматический;} \\ \sim 6 \text{ слой высокоортохроматический,} \\ \sim 3 \text{ слой панхроматический.} \end{cases}$

Гюбль⁶ предложил следующее видоизменение метода светофильтров. Фотографический слой экспонируют на дневном свегу под нейтрально-серым клином с известной константой и под тремя фильтрами—синим, желтым и красным (кривые абсорбции фильтров приведены на рис. 1). Таким

* Вопрос о сложении цветов в фотографии изложен в интересных работах А. ван-Кревальда², а также Уэбба³, на которых мы не имели возможности здесь останавливаться.

образом на пластинке получают три полосы с переменной плотностью; пластинку разрезают на 3 части и складывают эти части так, чтобы средние плотности совпали. По смещению „желтой“ и „красной“ полосок относительно „синей“ полоски при известной константе клина судят о том, во сколько раз (n) нужно увеличить освещенность, чтобы при данной продолжительности экспозиции получить в желтом или красном свете те же средние плотности, что и в синем свете. Величины $\frac{1}{n}$ дают значения

относительных „красной“ и „зеленой“ чувствительностей v_r и v_g —так называемые числа Гюбля. „Зеленая“ чувствительность есть разность между „желтой“ и „красной“ чувствительностями. Прямое определение под зеленым фильтром затруднено, так как зеленые фильтры всегда имеют пологую кривую абсорбции *.

Метод цветных таблиц заключается в съемке в фотографическом аппарате на испытуемом слое цветной таблицы. Из большого числа таблиц, предлагавшихся в разное время, опишем две наиболее интересные.

1. Ступенчатая цветная таблица „Агфа“⁸ представляет собой окруженные черным фоном четыре цветных полосы — красную, желтую, зеленую и синюю. Рядом с каждой из них расположена полоса, состоящая из ряда серых ступеней различной степени „серости“—от вполне белой до совершенно черной. Некоторая ступень будет на дневном свете обладать такой же яркостью, что и соседняя цветная полоса. Такая ступень обозначается через 100%; более темные ступени оцениваются соответственно меньшими, а более светлые—большими процентами. Если фотографический слой обладает такой же чувствительностью к отдельным цветам, что и человеческий глаз, то на негативном снимке, сделанном на испытуемом материале, ступени, обозначенные 100%, при некоторой экспозиции будут сливаться с цветными полосами. В таком случае данный фотографический слой будет давать правильную цветопередачу. Если же те или иные цветные полосы будут сливаться с более темными ступенями, то это значит, что чувствительность фотографического слоя к этим цветам меньше чувствительности человеческого глаза и составляет от нее процентную долю, какая указана на сливающейся серой ступени. На рис. 2 изображена фотография цветной таблицы на панхроматическом материале.

2. Таблица Лагорио⁹ основана на том же принципе, что и предыдущая таблица, но содержит 24 цветных полосы с максимумами диффузного отражения, последовательно перемещающимися от 400 до 700 м μ . Рядом с каждой цветной полосой напечатан всюду один и тот же серый ступенчатый клин. Кривая, соединяющая точки, в которых цветные полосы имеют одинаковую визуальную яркость с серыми ступенями, дает относительную кривую видимости человеческого глаза по спектру, а кривая, соединяющая точки равных фотографических плотностей каждой цветной полосы и серого клина, представляет собой относительную кривую цветочувствительности слоя, на котором была сфотографирована таблица.

Существенными недостатками обоих описанных выше методов являются, с одной стороны, невозможность получения чистых спектральных зон и произвольность выбора их, а с другой стороны, относительный характер полученных значений цветочувствительности и невозможность получить абсолютные значения.

В методе светофильтров даже Гюблю не удалось подобрать фильтры, вполне строго вырезающие определенные спектральные участки (рис. 1), а удов-

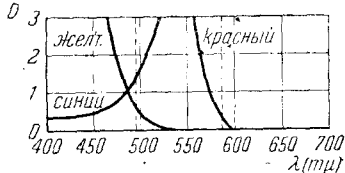


Рис. 1.

* Критике, в общем положительной, этого метода посвящена статья Гейзенберга и Бильца⁷.

летворительный зеленый фильтр ему вообще не удалось найти, вследствие чего для определения „зеленой“ чувствительности приходится пользоваться косвенным методом. Еще хуже положение вещей в методе таблиц. Бильц¹⁰ измерил для окрашенных пигментами цветных полей таблицы „Агфа“ кривые спектрального отражения, приведенные на рис. 3. Можно

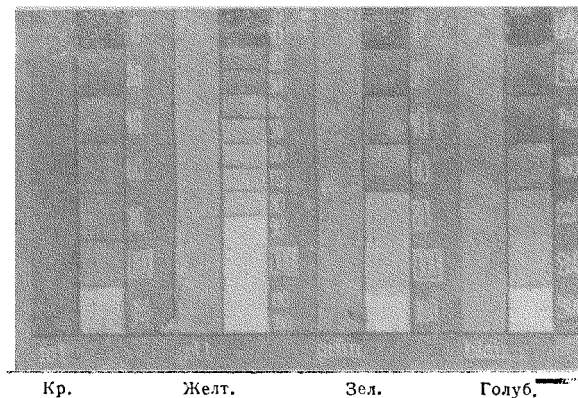


Рис. 2. Ступенчатая цветная таблица „Агфа“.

видеть, что кривые в значительной степени перекрывают друг друга, отражение в максимуме далеко не достигает 100%, причем особенно неудовлетворителен синий, а затем зеленый пигмент. В свете, отражаемом бумагой, окрашенной пигментами, содержание света посторонних спектральных зон достигает для синего пигмента 80%, а для красного пигмента — 33%.

Полученные результаты будут сильно зависеть от спектрального состава света источника; так, Бильц приводит поправочные коэффициенты

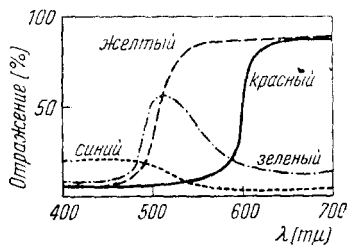


Рис. 3.

для таблицы „Агфа“ в случае освещения электрической лампой, оказывающиеся весьма значительными. Не меньшее значение имеет состав света источника и в методе светофильтров. Следует, кроме того, иметь в виду, что воспроизведение цветных таблиц представляет собой весьма сложную задачу, вследствие чего для получения надежных результатов приходится пользоваться таблицами, единообразно изготовленными в одном месте.

Но наиболее существенным дефектом методов цветовой сенситометрии являются, конечно, относительность по-

лучаемых значений и невозможность выразить цветочувствительность в абсолютных, например энергетических единицах.

В защиту определения цветочувствительности приводят обычно тот довод, что практически фотографическая съемка почти всегда производится в большом диапазоне длин волн, а не в монохроматическом свете, а поэтому и определение цветочувствительности должно производиться в эквивалентных условиях. Однако это условие в существующих методах соблюдается весьма слабо. Реальные цветные объекты имеют отражение обычно не в узкой спектральной области, а по всему спектру, причем цвет объекта определяется областью вблизи максимума на кривой отражения (по Оствальду это отвечает значительному содержанию белого

в данном цвете). Кроме того, ряд объектов обладает двумя максимумами отражения. Поэтому выбор какого-либо пигмента в качестве сравнительного объекта или применение светофильтра приводит к условным, неадекватным практике результатам. Можно сказать, что в методах цветовой сенситометрии спектральный состав света недостаточно чист для того, чтобы делать какие-либо количественные заключения о чувствительности к узким спектральным зонам, но в то же время недостаточно смешан, чтобы можно было считать воспроизведенными условия практической съемки.

§ 3. СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕНСИТОМЕТРИЯ

Мерой спектральной чувствительности фотографического слоя может служить либо плотность почернения, получаемая при данной экспозиции (т. е. при данном количестве падающего на пластинку монохроматического излучения), либо количество энергии монохроматического излучения, вызывающее определенный фотографический эффект (обычно — образование определенной плотности почернения).

В обычной сенситометрии для определения чувствительности применяют всегда второй метод, т. е. энергетическое выражение чувствительности. В спектральной сенситометрии исторически более ранним является также энергетическое выражение чувствительности. Первая работа, посвященная определению спектральной чувствительности в абсолютных энергетических единицах, принадлежит Леймбаху¹¹ (1909); она содержит весьма основательно измеренные энергетические кривые чувствительности в интервале от $\lambda=430$ м μ до $\lambda=680$ м μ при постоянных значениях плотности (1,0; 1,5 и 2,0). Измерения производились в призменном монохроматоре со шрифтом Нернста в качестве источника света. Для каждой длины волны с помощью болометра было определено количество энергии, проходящей через выходную щель. Для всех исследованных Леймбахом материалов количество энергии, необходимое для получения после проявления плотности 0,1 над вуалью (согласно пересчетам Бильца), составляло при $\lambda=450$ м μ в энергетических единицах 0,02—0,04 эрг/см² энергии той же длины волны. Кроме того, было установлено, что максимум спектральной чувствительности отвечает длинам волн, несколько меньшим 450 м μ .

Шефферс¹² воспользовался в качестве источника монохроматического излучения ртутной дугой, у которой светофильтром была выделена синяя ртутная линия ($\lambda=436$ м μ) и была измерена создаваемая ею в плоскости пластинки освещенность. Им были определены количества энергии, вызывающие на исследованной эмульсии после проявления образование различных плотностей. Если пересчитать эти данные, то количество энергии, вызывающее образование плотности 0,1 над вуалью, составит

$$E_{D=0,1}^{\lambda=436} = 0,0064 \text{ эрг/см}^2.$$

Гельмик¹³, работая с монохроматором и измеряя термоэлементом энергию, падающую на пластинку, определял количества ультрафиолетового излучения дающие минимальные почернения (пороги). Оказалось, например, что для $\lambda=365$ м μ

$$E_{D \approx 0,1}^{\lambda=365} = 0,028 \text{ эрг/см}^2. \text{ Гаррисон}^{14} \text{ определил чувствительность в ультрафиолетовой области нескольких типов английских и американских пластинок. Полученные им результаты не могут, однако, быть сравнены с другими данными, так как автор покрывал эмульсию флуоресцирующими маслами, что сильно увеличивало эффективную чувствительность к коротковолновой части спектра; так например, максимум чувствительности, вопреки данным всех других авторов, оказался лежащим около } \lambda=250 \text{ м}\mu.$$

Гаррисон¹⁴ определил чувствительность в ультрафиолетовой области нескольких типов английских и американских пластинок. Полученные им результаты не могут, однако, быть сравнены с другими данными, так как автор покрывал эмульсию флуоресцирующими маслами, что сильно увеличивало эффективную чувствительность к коротковолновой части спектра; так например, максимум чувствительности, вопреки данным всех других авторов, оказался лежащим около $\lambda=250$ м μ .

Джонс и Сандвик¹⁵ построили спектросенситометр, представляющий собой монохроматор с двойным разложением; перед его щелью был расположен диск с секториальными вырезами, угловые размеры которых тем меньше, чем дальше удаляться от центра диска (т. е. наподобие обычных сенситометров с вращающимся диском). Такой прибор давал возможность получить для любой длины волны одновременно ряд последовательно возрастающих по времени экспозиций (т. е. спектросенситограмму). Источником света служила ленточная лампа. От 700 до 360 м μ плотность светового потока I_{λ} в выходной щели монохроматора была промерена с помощью термоэлемента, а от 350 до 300 м μ — рассчитана по закону Планка для излучения абсолютно-черного тела, с учетом отражений от всех оптических поверхностей. Несколько одинаково экспонированных сенситограмм

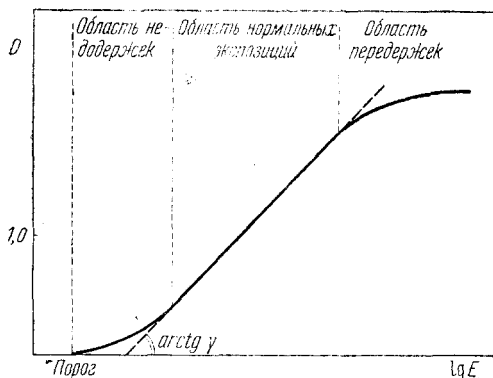


Рис. 4.

проявляли различное время, получая различные контрасты. В результате, для каждой длины волны получали семейство характеристических кривых, т. е. кривых на графике, где по оси абсцисс отложены логарифмы экспозиций, т. е. $\lg I_{\lambda} t$, а по оси ординат — оптические плотности D (рис. 4).

Чем дольше проявление, тем больше контраст $\gamma = \frac{dD}{d \lg E}$ (на прямолинейном участке характеристической кривой)*.

Спектральная чувствительность выражалась как величина, обратная количеству освещения (экспозиции) $I_{\lambda} t$, необходимому для получения при $\gamma=1,0$ плотности $D=1,0$; таким образом:

$$S_{\lambda} = \left(-\frac{1}{I_{\lambda} t} \right)_{D=1,0}. \quad (1)$$

Пользуясь такого рода расчетом, Джонс и Сандвик получили для ряда фотграфических материалов кривые спектральной чувствительности (рис. 5), у которых максимум оказался лежащим близ $\lambda=350$ м μ .

Лещинский¹⁶ с помощью электрической лампы, перед которой ставились светофильтры с узкой областью пропускания (приблизительно по 50 м μ), определил в квантовых единицах количества энергии с длинами волн около 435, 550 и 615 м μ , вызывающие у несенсибилизированной и у сенсибилизированных эритрозином и пинахромвиолетом эмульсий

* На практике контраст γ определяют как тангенс угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой к оси абсцисс,

образование минимальной плотности (порога), плотности 0,5 и плотности 1,0. Его данные приведены в табл. 1.

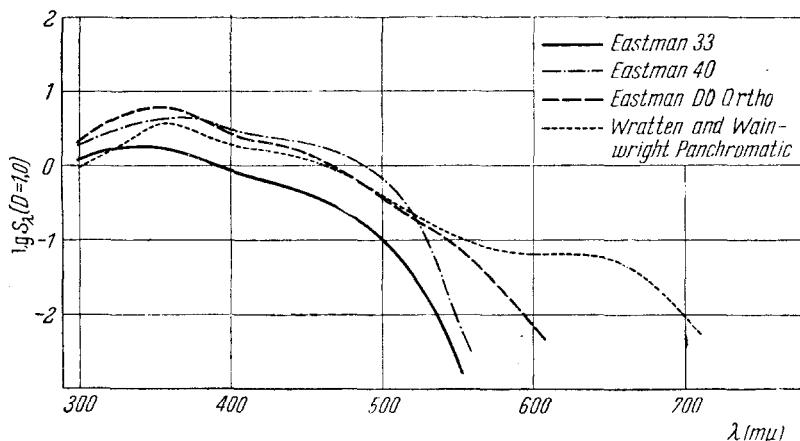


Рис. 5.

ТАБЛИЦА 1

λ (mμ)	Число квантов на 1 см ²		
	порог	0,5	1,0
несенсибилизированная эмульсия			
435	$8 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{11}$
550	$1 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{13}$
615	$1,5 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{16}$
сенсibilизировано эритрозином			
435	$8 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{11}$
550	$1,5 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$
615	—	—	—
сенсibilизировано пинахромфиолетом			
435	$8 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{11}$
550	—	—	—
615	$4 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{13}$

Если пересчитать эти данные на эрг/см², то получим, что $E_{D=0,1}^{\lambda=435} = 0,059$ эрг/см² и для несенсибилизированной и для сенсibilизированных эмульсий, в то время как $E_{D=0,1}^{\lambda=550} = 43$ эрг/см² для несенсибилизированной и 1,1 эрг/см² для сенсibilизированной эмульсии.

Упомянем еще исследование Вейцеля и Гесслера¹⁷, определивших спектральную чувствительность большого числа германских сортов пластинок весьма сомнительным методом экспонирования пластинки в кварцевом спектрографе с переменной в очень широком интервале (1:32) шириной щели и выражавших чувствительность в условных единицах относительно одного фотографического материала, произвольно выбранного в качестве стандарта.

Бильц¹⁸ подобно Шефферу освещал пластинку ртутной лампой, у которой фильтрами была выделена либо синяя ртутная линия с $\lambda=436$ м μ , либо зеленая линия с $\lambda=546$ м μ ; термозлементом была определена энергия в плоскости пластинки. Для приближения к условиям обычной сенситометрии, в частности к условиям принятой в Германии практической системы сенситометрии (DIN), Бильц освещал испытуемый слой в течение $\frac{1}{20}$ секунды через нейтрально-серый ступенчатый клин. Спектральной

чувствительностью называлась величина, обратная количеству энергии вызывающему после проявления образование плотности 0,1 над вуалью

т. е. $S_{\lambda} = \left(\frac{1}{E_{\lambda}} \right)_{D=0,1}$. Было исследовано большое число германских

фотографических материалов; для всех их чувствительность при $\lambda=436$ м μ („синяя“ чувствительность, характеризующая собственную чувствительность бромистого серебра) составляла от 77 до 4 см²/эрг, а чувствительность при $\lambda=546$ м μ (зеленая“ чувствительность, характеризующая среднюю добавочную чувствительность) составляла от „синей“ 0,3–0,6 для сенсibilизированных и 0,006 для несенсibilизированных слоев.

Мы видим, таким образом, что до 1932 г. лишь Леймбах и Джонс и Сандвик измерили всю кривую спектральной чувствительности в абсолютных энергетических единицах. Однако и тот и другой работали с монохроматором — прибором, мало удобным для практической работы. Поэтому в последние годы исследовательская мысль, естественно, стала искать возможности использования спектрографов, у которых в плоскости каустики известно распределение энергии (плотности светового потока) по длинам волн.

В этом направлении отметим, прежде всего, исследование Вильдта¹⁹, пользовавшегося в качестве источника света Альфой созвездия Лиры (цветовая температура ее около 11000°K), спектр которой хорошо изучен; однако данные чувствительности (для плотности 1,0) выражены в относительных энергетических единицах. В некоторой мере это относится и к работе Штоббе²⁰. Он применял дифракционный спектрограф с источником света, имеющим цветовую температуру 2700°K. Энергия в плоскости каустики была не промерена, а рассчитана по уравнению Планка в предположении, что вольфрамовая нить есть серое тело, причем поглощением оптической системы автор неосновательно пренебрегал. Экспозиция менялась с помощью призм Николя, расположенных перед щелью спектрографа, а также изменением размера щели. В соответствии с астро-

фотографической практикой Штоббе выбрал интервал продолжительностей экспозиции от 30 до 240 сек. Чувствительность выражалась в логарифмах количеств энергии, дающих плотность 0,1. Очевидно, что метод Штоббе в значительной степени несовершенен; при всем том полученные им кривые спектральной чув-

ТАБЛИЦА 2

Панхроматические материалы	$\Delta \lg E_{D=0,1}^{546-436}$	
	Бильц	Штоббе
Agfa Isochrom . . .	0,36	0,57
Agfa Aerochrom . . .	0,24	0,32
Agfa Superpan . . .	0,44	0,76

ствительности ряда фотографических материалов весьма интересны. Любопытно сравнить для одних и тех же фотографических материалов данные Бильца²¹ и Штоббе. В табл. 2 приведены рассчитанные последние разницы между чувствительностями при $\lambda = 426$ м μ и при $\lambda = 546$ м μ . Мы видим, что в среднем добавочная чувствительность по данным Штоббе составляет меньшую величину от „синей“ чувствительности, чем то следует по данным Бильца.

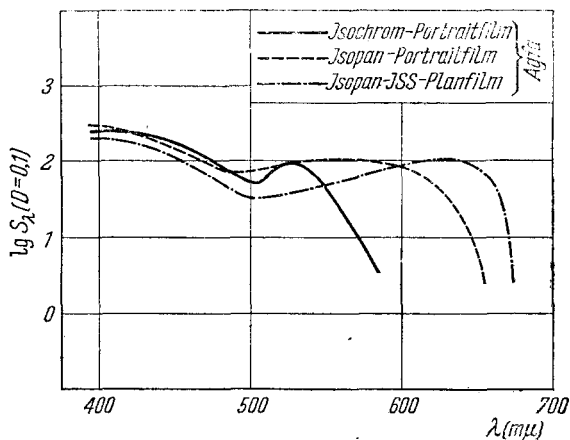


Рис. 6.

В 1935 г. появилась заслуживающая всяческого внимания работа Бильца²¹. Последнему удалось в дифракционном спектрографе (с дисперсией в среднем 7 м μ /мм) с большой тщательностью измерить термoelementом распределение энергии в плоскости каустики в интервале от $\lambda = 400$ м μ до $\lambda = 700$ м μ . Экспозиции варьировались изменением интенсивности падающего света с помощью нейтрально-серого ступенчатого клина при продолжительности экспозиции всего $\frac{1}{1000}$ секунды. Клин

имел 18 ступеней, выбранных так, что отношение крайних экспозиций составляло 1:50. Проявление велось по DIN. По расчетам автора, проанализировавшего все возможные ошибки, средняя квадратичная ошибка определения чувствительности (для плотности 0,1 над вуалью) составляла 19%. Были изучены новейшие фотографические слои производства „Агфа“; результаты приведены на рис. 6.

Интересно проведенное Бильцем сравнение спектральных чувствительностей (эрг/см²), с одной стороны, промеренных им в 1933 г. по старому методу для имевшихся тогда материалов, с другой, измеренных по новому методу для новейших фотографических материалов „Агфа“ (табл. 3).

Мы видим, что чувствительности возрасли весьма значительно; автор указывает, что отчасти это объясняется увеличением времени проявления с 7 до 15 мин.; последнего удалось достичь благодаря меньшей вуализуемости новых эмульсий сравнительно со старыми.

Упомянем, наконец, работу, проведенную в течение 1934–1935 гг. в Государственном оптическом институте в Ленинграде²². Пользовались призменным спектрографом и ленточной лампой в качестве источника света. Вследствие значительно более выгодного для данной цели распределения энергии в спектре и много меньшего количества рассеянного света внутри прибора призменный спектрограф должен быть, несомненно, предпочтен дифракционному спектрографу. Экспозиции менялись по шкале времени с помощью тщательно проградуированного затвора „Компур“.

ТАБЛИЦА 3

Старые измерения			Новые измерения		
	Чувствительность			Чувствительность	
$\lambda =$	436	546	$\lambda =$	436	546
Ортохроматические пленки					
Isochrom-Portraitfilm .	63	38	Isochrom-Portraitfilm	180	66
Isochrom-Rollfilm . .	48	21	Isochrom-Packfilm . .	130	72
Rollfilm	33	3,3	Isorapid-Packfilm . .	98	75
Панхроматические пленки					
Superpan-Portraitfilm	63	31	Isopan-Portraitfilm .	160	89
Superpan-Rollfilm . .	39	14	Isopan-ISS-Packfilm .	150	89

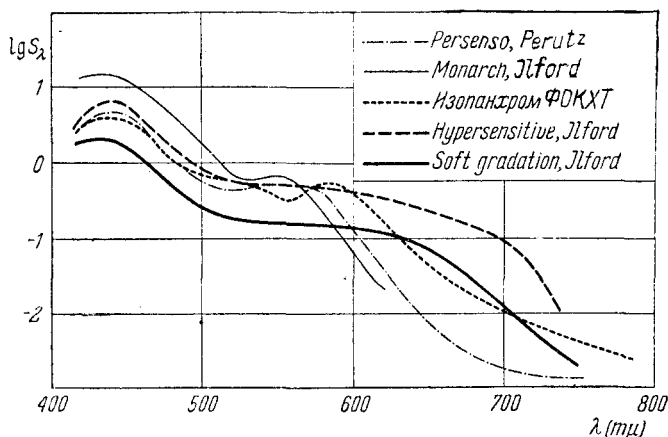


Рис. 7.

Спектральная чувствительность определялась в эрг/см^2 по плотности почернения 1,0 (за вычетом вуали). Были исследованы различные фотографические материалы; результаты приведены на рис. 7 и 8.

Любопытно, что для всех исследованных в этой работе фотографических материалов, сенсibilизированных к видимым частям спектра, „зеленая“ чувствительность ($\lambda = 546 \text{ мμ}$) составляла 4—13% „синей“ чувствительности ($\lambda = 436 \text{ мμ}$), т. е. долю, много меньшую, чем это следует по Бильцу (30—60%) и Штоббе (20—45%), пользовавшимся дифракционными спектрографами.

Как уже указывалось в начале этого параграфа, применяется еще один метод выражения спектральной чувствительности—по плотности, получаемой при освещении фотографического материала данным количеством монохроматического излучения. Для того чтобы иметь возможность сравнивать чувствительности при разных длинах волн, в этом методе надо иметь „выравненный“ спектр, т. е. спектр с одинаковой плотностью светового потока по всей его длине. Большинство источников света (электрические лампы) имеет цветовую температуру от 2000 до 3000°K, что соответствует

положению максимума энергии между $\lambda = 1450$ и 965 м μ . Таким образом задача заключается во введении перед фокальной плоскостью спектрографа оптического или механического устройства, ослабляющего в возрастающей с длиной волны степени желто-красную часть спектра. На прак

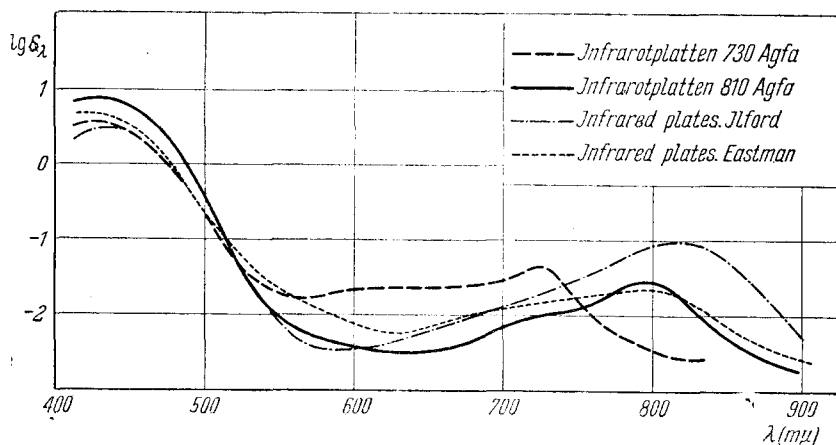


Рис. 8.

тике применяется лишь одно устройство такого рода—выравниватель энергии по Шмишкеу. Шмишек²³ располагал перед кассетой дифракционного спектрографа диск наподобие того, как это делается в сенситометрах с вращающимся диском. В диске делался фигурный вырез (рис. 9).

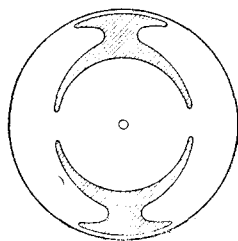


Рис. 9.

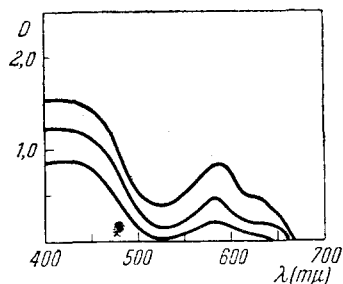


Рис. 10.

Ширина выреза на разных расстояниях от центра диска была обратно-пропорциональна плотности светового потока в точке спектра, расположенной против этого места выреза. При вращении диска на разных расстояниях от его оси получаются различные продолжительности освещения, в результате чего на пластинку падают одинаковые количества энергии всех длин волн. На рис. 10 приводятся кривые эквивалентной чувствительности для одного из материалов, исследованных Шмишкем²⁴; три кривые соответствуют трем разным экспозициям. Из этих кривых видно, что они не параллельны друг другу; с увеличением разницы в экспозициях эта непараллельность выступает все более резко²⁵, приводя часто к полному изменению формы кривой (рис. 11, заимствованный из статьи Аренса и Эггерта²⁶). Объясняется это тем, что средние плотности

лежат на прямолинейном участке характеристической кривой, а малые и большие плотности—на пологих концах ее. Это обстоятельство делает эквиэнергетические кривые $D-\lambda$ мало пригодными для абсолютного выражения спектральных свойств фотографических материалов. На практике, однако, этим методом нередко пользуются.

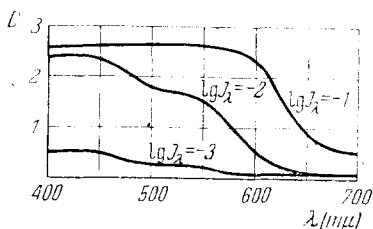


Рис. 11.

§ 4. СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ЦВЕТОПЕРЕДАЧА

Как мы уже указывали вначале, одним из основных требований, предъявляемых к фотографическому материалу, является возможность получения снимка с правильной передачей цветов.

В переводе на язык спектральной сенситометрии это значит, что кривая спектральной чувствительности должна совпадать с кривой относительной видимости человеческого глаза, взятой в соответственном масштабе. На рис. 12 приведена кривая видимости, у которой по оси ординат отложены логарифмы относительной видимости; такая кривая видимости может быть сравнима с приводимыми в этой статье кривыми спектральной чувствительности. Максимум кривой лежит при $\lambda=555$ м.μ. Между тем, кри-

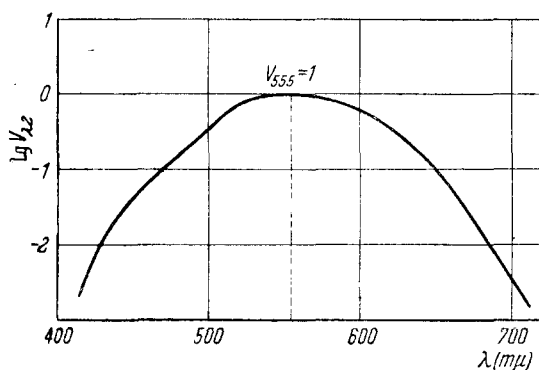


Рис. 12.

вые спектральной чувствительности, как мы уже видели, даже для наиболее сенсibilизированных эмульсий имеют максимум в сине-фиолетовой части спектра. Поэтому при фотографической съемке перед объективом должен быть установлен светофильтр, "срезающий" избыток чувствительности в синей части спектра (обычно весьма большой), а отчасти и в других частях спектра. Фотографический материал в комбинации с таким желтым фильтром будет обладать чувствительностью, адекватной чувствительности человеческого глаза; кривая на рис. 10 представляет, таким образом, также и спектральную чувствительность идеального фотографического материала, дающего правильную цветопередачу.

Для определения характера передачи цветов фотографическим материалом предлагается также следующий метод выражения спектральной чувствительности²⁶. Пользуются не энергетической кривой спектральной чувствительности, а яркостной, т. е. чувствительность выражается величиной, обратной яркости монохроматического излучения, дающей данный фотографический эффект. Чувствительность по яркости S_λ' может быть получена простым пересчетом чувствительности по энергии S_λ (заметим

для дальнейшего, что при этом различные экспозиции на спектрограммах должны быть получены изменением исключительно освещенности, а не времени экспозиции). Если

$$S_{\lambda} = \left(\frac{1}{E_{\lambda}} \right)_{D = \text{const}}, \quad (2)$$

то

$$S_{\lambda}' = \left(\frac{1}{B_{\lambda}} \right)_{D = \text{const}} = \left(\frac{1}{E_{\lambda} V_{\lambda}} \right)_{D = \text{const}}, \quad (3)$$

где E_{λ} и B_{λ} — освещенность в энергетических единицах (энергия на единицу площади) и яркость монохроматического излучения, а V_{λ} — относительная видимость при данной длине волны. На рис. 13 приведена такая кривая спектральной чувствительности по яркости (в логарифмическом масштабе). Мы видим, что ее форма весьма существенно отличается от энергетической кривой, причем к концам спектра чувствительность резко возрастает (ибо возрастает количество энергии, дающее данную яркость), достигая бесконечности на границах видимого спектра. Очевидно, что фотографический слой, правильно передающий цвета, должен обладать кривой спектральной чувствительности по яркости, параллельной оси абсцисс, т. е. равные яркости должны при всех длинах волн давать равные плотности почернения.

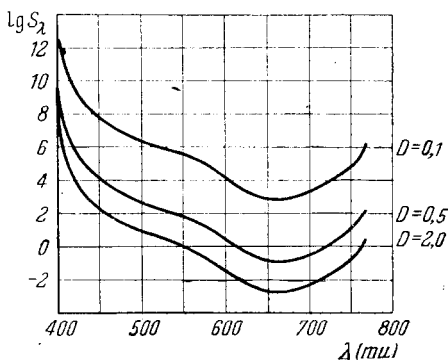


Рис. 13.

Этому методу выражения нельзя отказать в рациональности, если исследователя интересует правильность цветопередачи. В остальных случаях он вряд ли может быть рекомендован, поскольку кривая по яркости получается пересчетом все той же энергетической кривой, а, кроме того, кривая по яркости ограничена пределами видимой части спектра (резкие подъемы кривой чувствительности около $\lambda = 400 \text{ мμ}$ и $\lambda = 700 \text{ мμ}$ уже не имеют реального смысла).

Если не касаться вопроса о том, в какой мере аддитивно действие света различных длин волн (вопроса, естественно возникающего, коль скоро имеет дело со светом различного спектрального состава), то можно сказать, что спектральная сенситометрия дает возможность определять характер цветопередачи данным фотографическим материалом отнюдь не хуже, чем это делает цветовая сенситометрия.

§ 5. ЧАСТНЫЕ ВОПРОСЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕНСИТОМЕТРИИ

В спектральной сенситометрии так же как и в сенситометрии общей, весьма большое значение имеет вопрос о способе экспонирования исследу-

двумого фотографического слоя. Экспозиция или количество освещений есть произведение освещенности I на время ее действия t .

$$E = It. \quad (4)$$

Одно и то же количество освещения может быть получено и за малый интервал времени при большой освещенности и за долгий срок при малой освещенности. Очевидно также, что экспозицию можно варьировать двумя способами: либо изменением времени t (шкала времени), либо изменением освещенности (шкала освещенности).

Однако, как показал Абней (1874), а затем и ряд других авторов, одна и та же экспозиция может давать совершенно различные фотографические эффекты в зависимости от соотношения между величинами I и t . Значит, образование видимого фотографического изображения — того, которое получается после проявления (мы ничего не можем сказать о скрытом изображении), — не подчиняется фотохимическому закону взаимозаместимости Роско и Бунзена. Для фотографического изображения оказалось, что чем медленнее действие данного количества света, тем фотографический эффект меньше.

Шварцшильд (1899) установил, что для процесса образования видимого фотографического изображения действует закон

$$It^p = \text{const}; \quad (5)$$

здесь показатель степени p — так называемый коэффициент Шварцшильда — представляет собой величину, характерную для данного фотографического материала и равную обычно 0,7–0,9.

Исходя из этого закона, часто считают, что в сенситометрии изменение экспозиции посредством изменения освещенности (шкала освещенности) имеет преимущества перед изменением времени (шкала времени), так как в первом случае переменная экспозиция пропорциональна фотографическому эффекту, а во втором — нет. Но это — чистейшее недоразумение. Уравнение Шварцшильда может быть написано, как указывает сам автор, в форме

$$I^q t = \text{const}, \quad (6)$$

где

$$q = \frac{1}{p}, \quad (7)$$

и тогда экспозиции будут пропорциональны времени экспозиции, но не пропорциональны освещенности. Кроме того, впоследствии было выяснено, что уравнение Шварцшильда вообще является весьма условным: коэффициент p — мало постоянная величина, зависящая и от t , и от I , от оптической плотности, от характера фотографического материала и, наконец, от длины волны. Согласно новейшим исследованиям, в особенности работам Аренса и Эггерта²⁷, свойства фотографического слоя не могут быть полностью описаны одной и даже несколькими характеристическими кривыми; это может быть сделано лишь построением целой характеристической поверхности с координатами D , $\lg I$, $\lg t$.

Разрезы этой поверхности параллельно оси $\lg t$ дают семейство характеристических кривых $D - \lg t$ при разных $I = \text{const}$; разрезы же параллельно оси $\lg I$ дают семейство характеристических кривых при разных $t = \text{const}$. Оказалось, что и в том и в другом случаях отдельные кривые семейства не параллельны друг другу и имеют разную форму и наклон. Таким образом в действительности при образовании фотографического по-

чернения действует какой-то более сложный закон, нежели предложенный Шварцшильдом. Не входя в обсуждение ряда уравнений, предлагавшихся в разное время²⁸, укажем, что наиболее общей формой уравнения фотографического почернения является, пожалуй, уравнение, близкое по форме к уравнению Штарка²⁹, согласно которому фотографическая плотность

$$D = \lg (k I^m t^n). \quad (8)$$

Подобное уравнение, содержащее при I и t показатели степени, отличные от единицы и постоянные лишь в известном интервале экспозиций, объясняет переменный наклон характеристических кривых $D - \lg I$ и $D - \lg t$, полученные Аренсом и Эггертом.

Мы приходим, таким образом, к заключению, что нет принципиальной разницы между шкалой освещенности и шкалой времени, и что пользование любой из них при определении спектральной чувствительности равноценно. Но так как при практической фотографической съемке имеют дело с различными яркостями отдельных частей объекта, снимаемого в течение известного постоянного времени, т. е. со шкалой интенсивности, то в целях наибольшего соответствия сенситометрических данных практике предпочтительно, все-таки, пользоваться этой последней шкалой. Интервал освещенностей на испытуемой пластинке должен быть таким, чтобы время экспозиции при сенситометрировании приближалось к практически употребляемым при съемках; в большинстве случаев (в кинематографии, при съемках на открытом воздухе и т. д.) время будет составлять от $\frac{1}{100}$ до $\frac{1}{10}$ секунды, в специальных случаях, например в астрофотографии — минуты.

Мы приходим, таким образом, к необходимости видоизменять условия сенситометрирования в зависимости от назначения фотографического материала. В первом приближении можно этого не делать, но, конечно, — это единственно правильный путь. Испытание материала должно отвечать условиям его эксплуатации. Правда, при этом теряется единообразие в результатах и несколько затрудняется их сравнение, но зато качество получаемых результатов значительно возрастает.

Этот же вопрос ярко выступает и в другом случае — при выборе условий проявления в сенситометрии. Удачно поступали Джонс и Сандвик¹⁸. Последние проявляли спектрограммы до определенного контраста, а именно до $\gamma = 1$, тем самым в значительной степени исключая влияние проявителя. Практически, однако, это не очень удобный способ. На VII и VIII Международных фотографических конгрессах (1928 и 1931 гг.) была тенденция установить единый сенситометрический проявитель. В качестве такового был выбран параамидофеноловый проявитель определенного состава. В настоящее время стала, однако, почти очевидной несостоятельность такого рода попытки, и в ряде случаев, например во введенной в Германии всего лишь несколько лет назад промышленной системе сенситометрии по DIN³⁰, применяется не параамидофеноловый, а практический метол-гидрохиноновый проявитель. В 1935 г. Джонс и Рессель³¹ в статье, посвященной именно стандартной сенситометрии, эту обратную тенденцию довели до ее предельного выражения: авторы предлагают при сенситометрии для каждого материала пользоваться тем проявителем, который производящей организацией рекомендуется для него как оптимальный. Проявление при этом ведется до достижения γ , лежащей между 0,8 и 1,1. Надо при этом учитывать возможность того, что различные проявители будут несколько изменять самую форму кривой спектральной чувствительности. Это возможно потому, что при переходе от одного проявителя к другому форма характеристических кривых для разных длин волн будет меняться неодинаково.

Следующим вопросом является выбор фотографического эффекта, по которому следует определять спектральную чувствительность. В общей сенситометрии до недавнего прошлого чувствительность определялась либо

по порогу, либо по точке инерции, т. е. по пересечению продолжения прямолинейного участка характеристической кривой с осью абсцисс (Хертер и Дриффильд). В настоящее время оба эти метода как устаревшие постепенно оставляются. Обычно чувствительность определяют по некоторым характеристикам области недодержек: по энергии, вызывающей образование плотности почернения 0,1 над вуалью (система DIN), или по энергии,

отвечающей минимальному полезному градиенту, т. е. точке, где $\frac{dD}{d \lg E} = 0,5 \gamma$ (Джонс). Последний метод несколько сложен и в спектральной сенситометрии до настоящего времени не применялся. По плотности 0,1 над вуалью спектральные чувствительности определяли Билль и Штоббе. Ряд авторов (Джонс и Сандвик, Лещинский, Вильдт) определял спектральную чувствительность по плотности 1,0 над вуалью. Этот способ не применяется в общей сенситометрии, но в спектральной сенситометрии он очень удобен; плотность 1,0 лежит обычно в середине прямолинейного участка характеристической кривой, т. е. в наиболее интересной ее части, и, кроме того, удобна для измерений, так как весьма значительно превышает величину вуали даже сильно вуализующихся слоев; учитывая большое количество измерений, которое приходится производить при построении кривой спектральной чувствительности, этим последним обстоятельством нельзя пренебрегать.

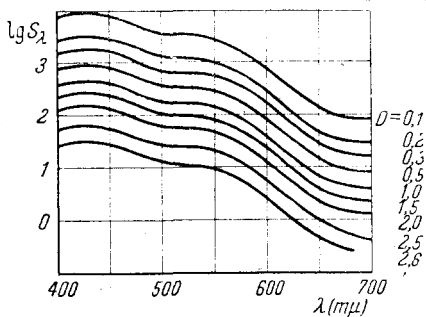


Рис. 14.

Что касается сравнимости спектральных чувствительностей, определенных для разных значений плотности, то здесь надо учитывать форму характеристических кривых при разных длинах волн. Если характеристические кривые $D - \lg E$ с длиной волны перемещаются вдоль оси абсцисс параллельно самим себе, не меняя своей формы и наклона (γ), то очевидно, что кривые спектральной чувствительности, исходящие из разных плотностей, будут совершенно по-

добны друг другу. Это иллюстрируется схематически рис. 14, взятым из цитированной выше обзорной статьи Аренса и Эггерта.

В действительности неизменность формы характеристической кривой при разных длинах волн отнюдь не является доказанной. В литературе имеется много указаний, весьма, правда, противоречивых, согласно которым контраст γ и коэффициент Шварцшильда p (точнее, форма характеристической поверхности) зависят от длины волны. Данное обстоятельство заставляет с осторожностью подходить к сравнению кривых спектральной чувствительности, построенных по различным значениям плотности (0,1; 1,0 и т. д.), и позволяет считать эти кривые параллельными друг другу лишь в первом приближении.

Последнее замечание. Часто для оценки спектральных свойств фотографического слоя ограничиваются приведением спектросенситограммы. Такой прием, хотя бы и для совершенно практических целей, вряд ли может быть рекомендован. Вследствие резкого возрастания плотности светового потока в спектре с длиной волны (максимум излучения источника света лежит в инфракрасной части спектра) максимум сенсibilизации получается весьма преувеличенным сравнительно с максимумом „синей“ чувствительности, создавая искаженное представление о характере и качестве сенсibilизации. Кроме того, это же обстоятельство вызывает кажущееся смещение положения максимума в сторону больших длин волн — явление, наблюдаемое особенно отчетливо в инфракрасной части спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Davis a. K. S. Gibson, Filters for the reproduction of sunlight and daylight and the determination of color temperature. Misc. Public. Bureau Stand. № 114, 1931.
2. A. van Kreveld, Physica, **1**, 60—77, 1933; Z. wiss. Phot., **32**, 222—230, 1934.
3. J. H. Webb, J. Opt. Soc. Am., **26**, 12—23, 1936.
4. M. Biltz u. H. Brandes, Veröff. Agfa, **3**, 85—92, 1933.
5. J. Eggert, Z. wiss. Phot., **34**, 54—58, 1935; Veröff. Agfa, **4**, 35—41, 1935.
6. A. Hübl, Phot. Korrr., **64**, 229—231, 265—271, 299—302, 332—335, 1928.
7. E. Heisenberg u. M. Biltz, Phot. Korrr., **66**, 169—174, 198—203, 1930.
8. H. Arens u. J. Eggert, Veröff. Agfa, **1**, 36—46, 1930; Z. wiss. Phot., **29**, 239—261, 1930; M. Biltz, Veröff. Agfa, **4**, 42—48, 1935.
9. A. Lagorio, Phot. Ind., **28**, 629—631, 1930.
10. M. Biltz, Veröff. Agfa, **4**, 42—48, 1935.
11. G. Leimbach, Z. wiss. Phot., **7**, 157—178, 181—206, 1909.
12. H. Scheffers, Z. Physik, **20**, 109—128, 1923.
13. P. S. Helmick, J. Opt. Soc. Am., **6**, 998—1015, 1922; **9**, 521—540, 1924.
14. G. R. Harrison, J. Opt. Soc. Am. **11**, 113—123, 341—356, 1925.
15. L. A. Jones a. Otto Sandvick, J. Opt. Soc. Am., **12**, 401—416, 1926.
16. W. Leszinski, Z. wiss. Phot., **24**, 261—275, 1927.
17. W. Weizel u. F. Gössler, Z. techn. Phys., **12**, 587—593, 1931.
18. M. Biltz, Physik. Z. **34**, 200—204, 1933.
19. R. Wildt, Phot. Korrr., **69**, 81—86, 1933.
20. J. Stobbe, Astron. Nachr., **251**, 65—74, 1934.
21. M. Biltz, Physik Z., **36**, 559—563, 1935; Veröff. Agfa, **4**, 26—34, 1935.
22. Е. Г. Валяшко и Ю. Гороховский, Journ. techn. Phys. USSR; Фото-кино-химическая промышленность, 1936 (в печати).
23. U. Schmieschek, Phot. Ind., **26**, 1086—1089, 1928.
24. U. Schmieschek, Z. techn. Phys., **14**, 284—288, 1933.
25. См. например, рис. 5 в статье L. Kutzleb, Kinotechnik., **11**, 328—331, 1929.
26. H. Arens u. J. Eggert, Z. wiss. Phot., **29**, 239—261, 1930; Veröff. Agfa, **1**, 25—46, 1930. Эта статья содержит весьма интересное и систематическое изложение принципов спектральной сенситометрии.
27. H. Arens, Veröff. Agfa, **1**, 11—24, 1930; **4**, 15—25, 1935 и др.
28. Подробно этот вопрос изложен в книге К. В. Чибисова, Теория фотографических процессов, т. 1, гл. 2, 1935.
29. J. Stark Ann. Phys., (4) **33**, 1456—1462, 1910; **35**, 461—485, 1911.
30. E. Goldberg, Z. wiss. Phot., **31**, 81—83, 1931.
31. L. A. Jones a. M. E. Russel, Phot. Journ., **75**, 657—675, 1935; J. Opt. Soc. Am., **25**, 396—411, 1935.