

17-1336  
10

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

УСПЕХИ  
НАУЧНОЙ  
ФОТОГРАФИИ

X

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р  
КОМИССИЯ ПО НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ И КИНЕМАТОГРАФИИ

# УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Том X

КАЧЕСТВО ФОТОГРАФИЧЕСКОГО  
ИЗОБРАЖЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
Москва · 1964 · Ленинград

238698

Редакционная коллегия:

чл.-корр. АН СССР К. В. Чибисов, проф. Ю. Н. Гороховский  
(отв. редактор), канд. физ.-мат. наук А. Т. Ащеулов,  
проф. Г. А. Истомин, проф. Г. П. Фаерман, канд. техн. наук  
И. А. Черный и канд. хим. наук В. И. Шеберстов

238698  
Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Иргизской ССР

УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ  
Том X

Утверждено к печати  
Комиссией по научной фотографии и кинематографии  
Академии наук СССР

Редактор издательства Э. О. Травицкая. Технический редактор Р. А. Замараева.  
Корректоры: Л. Б. Данилова и Н. П. Кизим.

Сдано в набор 22/1 1964 г. Подписано к печати 25/IV 1964 г. РИСО АН СССР № 6-2В. Формат  
бумаги 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. л. 8<sup>3</sup>/<sub>8</sub>. Печ. л. 16<sup>3</sup>/<sub>4</sub> = 22,94 усл. печ. л. + 3 вкл. Уч.-изд. л. 21,31 + 3 вкл. (0,33).  
Изд. № 2194. Тип. зак. № 582. М-27573. Тираж 1400. ТП 1963 г. № 467. Цена 1 р. 52 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»  
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. издательства «Наука». Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12

## ОТ РЕДАКЦИИ

Настоящий том «Успехов научной фотографии» посвящен проблеме качества фотографического изображения с точки зрения объема даваемой изображением информации, его резкости и зернистой структуры. Эта проблема представляет собой одну из важнейших проблем современной фотографической науки и фотокинетехники, ей уделяется очень много внимания как в Советском Союзе, так и за рубежом. Она переплетается с проблемами качества инструментального оптического, зрительного и телевизионного изображений и в настоящее время должна решаться с привлечением математических приемов теории оптических приборов и теории телевизионной техники. С другой стороны, она переплетается с энергетическими вопросами фотографического процесса: всякое повышение качества фотографического изображения в любом из указанных выше аспектов есть проявление роста энергетической эффективности (светочувствительности) фотографирующей системы.

Настало время обобщить достигнутое в данной области советскими учеными за последние годы. Достижению этой цели должен, в известной мере, служить настоящий сборник. Он состоит в основном из докладов на 13-м совещании по научной фотографии, посвященном качеству фотографического изображения и состоявшемся в Москве 29 января—1 февраля 1962 г. Кроме того, в него входит несколько научных работ (отмеченных в содержании звездочками), поступивших позже и не докладывавшихся на этом совещании; среди них две были доложены на симпозиуме по структурным свойствам фотографических материалов и их информационной способности, состоявшемся в Казани 30 сентября 1963 г.

Сборник оригинальных работ и многочисленных обзоров не может, естественно, заменить книги, в которой была бы систематически рассмотрена интересующая нас проблема во всей ее многогранной сложности. Долг наших ученых — создать такую насущно необходимую книгу.

К. В. ЧИБИСОВ

### ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО НА 13-м СОВЕЩАНИИ ПО НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Развитие всех отраслей науки, техники и народного хозяйства Советского Союза должно подчиняться тому перспективному плану, который был намечен XXII съездом КПСС. Принятая на этом съезде новая Программа КПСС обобщает богатейший опыт социалистического строительства в СССР и является творческим развитием революционного учения Маркса—Энгельса—Ленина. Она с особой силой подчеркивает значение науки для прогресса всех отраслей народного хозяйства, для подъема культуры в нашей стране. Перед советской наукой поставлены две основные задачи: развитие теоретических исследований и соединение науки с производством.

XXII съезд КПСС указал советским ученым на необходимость прежде всего закрепить уже завоеванные отечественной наукой передовые позиции в важнейших областях знания и в дальнейшем обеспечить ей ведущую роль в мировой науке по всем основным направлениям. Эта ответственная задача может быть решена только теми путями, которые указаны в Программе КПСС, а именно: всемерным развитием теоретических направлений науки и тесным переплетением науки и производства. Иными словами, в наше время прогресс промышленности и прогресс науки неразрывно связаны между собой. Поэтому успехи теоретических разработок, которые получают самое широкое развитие, должны иметь решающее влияние на технический прогресс.

Фотографическая наука и техника не относятся к основным, ведущим направлениям науки и техники; тем не менее эта область знания имеет огромное значение, с одной стороны, как основа изобразительного искусства фотографии и особенно кинематографии, а с другой — как вспомогательное средство, используемое в различных областях народного хозяйства. В настоящее время практически любая отрасль науки и техники в той или иной степени применяет фотографические и кинематографические методы исследования или контроля. Поэтому не подлежит сомнению, что научный и технический прогресс в области фотографии и кинематографии должен в полной мере обеспечить требования, выдвигаемые Программой КПСС по отношению к различным направлениям науки, техники, народного хозяйства и культуры.

Настоящее совещание посвящено обширному кругу весьма важных вопросов о качестве фотографического изображения. Эти вопросы в такой широкой постановке рассматриваются у нас впервые, хотя комплексная проблема качества изображения не является принципиально новой. В фотографии и кинематографии всегда ставился вопрос, каково качество полученного изображения, однако оценка была такой: хорошее или плохое изображение, резкое или нерезкое, контрастное или малоконтрастное,

т. е. оценка носила описательный характер. В настоящее время такое положение дел с оценкой качества становится уже неудовлетворительным не только в фотографии и кинематографии, но и в других областях народного хозяйства.

Расширившееся применение малоформатной фотографии, узкоплечная кинематография, использование фотографии для различных целей документирования и научной регистрации, а также часто заметное ухудшение качества изображений на особо высокочувствительных фотографических материалах все настойчивее выдвигали задачу количественной оценки фотографической информации и нахождения путей увеличения ее объема. Вместе с тем такие количественные методы, как фотографическая сенситометрия, резольвометрия, деталометрия, теория тоновоспроизведения, не давали возможности в полной мере решить указанную задачу. В связи с этим все больше внимания уделялось, особенно в послевоенные годы, разработкам методов объективной оценки качества фотографического изображения и нахождению соответствующих критериев информационной способности кинофотоматериалов. Этот путь представлял также большой интерес для нахождения средств устранения недостатков эмульсионных слоев и усовершенствования их обработки. В последнее время в фотографии и кинематографии все шире начинают применяться методы теории информации.

К сказанному следует добавить, что, кроме фотографии и кинематографии, существуют и другие технические системы, а именно оптические, электронно-оптические, телевизионные, которые передают или сохраняют информацию. При всем их разнообразии и различии общим для них является то, что источником информации служат изображения. Поэтому представляется естественным и полезным обобщение результатов исследования качества изображений при использовании различных технических систем и взаимное совершенствование методов объективной оценки их информационной способности. Важным представляется также распространение методов теории информации и на зрительный анализатор.

Программа совещания весьма обширна. На первом месте по числу докладов стоит Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (13 докладов), затем идет Всесоюзный научно-исследовательский кинофототехинститут (6 докладов); остальные доклады представлены восьмью научными учреждениями. Таким образом, советскими учеными уделяется в настоящее время серьезное внимание сложной и практически исключительно важной проблеме качества изображений, получаемых различными системами, хотя изучение этих вопросов начато у нас со значительным запозданием. В связи с этим уместно указать, что за рубежом было несколько аналогичных совещаний, а методы объективной оценки уже начали применяться в промышленности.

В заключение следует выразить уверенность, что обмен опытом и обсуждение отдельных вопросов обязательно принесут пользу и послужат новым стимулом для развития научно-исследовательских работ в данной области.

## I. КАЧЕСТВО ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А. Т. АЩЕУЛОВ, Т. А. ПАВЛИЧУК, М. Д. ХУХРИНА

### ОЦЕНКА ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО СИНУСОИДАЛЬНОЙ РЕШЕТКЕ

#### Введение

Одной из трудных задач в технике аэрофотографии является задача выбора оптимальных параметров фотографических систем, т. е. параметров, обеспечивающих при наименьших затратах получение снимков, на которых передаются интересующие нас детали земной поверхности. Это объясняется тем, что качество аэроснимка зависит от состояния атмосферы в момент съемки, характеристик объектива, пленки, механизмов амортизации и компенсации сдвига изображения, точности фокусировки аэрофотографического аппарата, т. е. от многих факторов.

Разумный выбор параметров аэрофотоаппарата и согласование требований к его элементам возможно осуществить только в том случае, если у создателей аппаратуры имеется метод, который позволяет количественно оценить влияние на качество снимка условий съемки и отдельных элементов аэрофотоаппарата и предсказать результаты фотографирования всей системой. До сих пор суждения о параметрах фотографических систем основывались на оценке изображения разрешающей способностью.

Этот метод, однако, не свободен от некоторых недостатков, и в настоящее время делаются попытки применить для оценки изображающих систем метод частотно-контрастной характеристики по синусоидальной решетке [1].

#### Методы оценки изображающих систем

Основное свойство любой изображающей системы состоит в том, что светящаяся геометрическая точка изображается ею в виде пятна конечных размеров. Это явление приводит к тому, что не существует фотометрического подобия между распределением освещенности в изображении и распределением яркости в предмете; в изображении освещенность меняется более плавно, чем в предмете, и контуры оказываются размытыми, менее резкими. Степень несоответствия распределения освещенности в изображении распределению яркости в предмете служит мерой качества изображающей системы. О качестве системы можно судить по изображению любого предмета, однако для численной оценки удобнее пользоваться только предметами простейшей геометрической формы. В оптике и фотографии для этой цели применяются следующие предметы (тест-объекты): светящаяся геометрическая точка и линия, граница прямолинейного края, решетки с П-образным и синусоидальным распределением прозрачности.

Изображение бесконечно узкого линейного источника имеет конечную ширину и в некоторых случаях несимметричное распределение света в направлении поперек полосы. Скачкообразное изменение яркости на прямой линейной границе резкого края в изображении заменяется плавным и иногда несимметричным относительно геометрического изображения границы. В случае П-образной решетки также вместо скачкообразного изменения яркости на границе штриха в изображении получается плавное изменение освещенности: П-образная решетка превращается в синусоидальную, при определенных условиях имеет место обращение контраста.

Особое положение среди этих тест-объектов занимает синусоидальная решетка. Если освещенность в решетке следует закону

$$E(x') = a_0 + a \cos 2\pi N'x', \quad (1)$$

то распределение освещенности в изображении на оси и вне оси подчиняется соответственно формулам

$$E'(x') = a_0 + aT_0 \cos 2\pi N'x' \quad (2)$$

и

$$E'(x') = a_0 + aT_0 \cos(2\pi N'x' - \varphi'), \quad (3)$$

где  $N'$  — число периодов синусоидальной решетки в единице длины.

Таким образом, синусоидальная решетка изображается объективом также в виде синусоидальной решетки. Оптическое изображение ее отличается от самой решетки в двух отношениях: во-первых, амплитуда колебаний освещенности в изображении меньше, чем в самой решетке, и, во-вторых, вне оси изображение решетки не совпадает с его положением, рассчитанным по законам геометрической оптики. Эти отличия количественно оцениваются величинами  $T_0$  и  $\varphi'$ .

Если определить контраст предмета и изображения формулой

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (4)$$

то из (1) и (2) видно, что  $T_0$  есть отношение контраста изображения решетки к контрасту самой решетки; его называют коэффициентом передачи контраста, величину же  $\varphi'$  называют смещением фазы. Эти величины зависят от частоты решетки  $N'$ . Функции  $T_0(N')$  и  $\varphi(N')$  являются модулем и аргументом комплексной функции

$$D_0(N') = \int_{-\infty}^{\infty} L(u') e^{-i2\pi N'u'} du', \quad (5)$$

которую называют комплексным коэффициентом передачи контраста или частотно-контрастной характеристикой изображающей системы. В последней формуле  $L(u')$  — функция распределения освещенности в изображении линейного источника.

Рассмотрим возможные критерии качества системы на примере названных выше тест-объектов. Функция распределения освещенности в изображении линейного источника является исчерпывающей характеристикой изображающей системы в том смысле, что ее знание позволяет предсказать распределение освещенности в изображении любого из остальных одномерных тест-объектов. Но для практических целей применение функции распределения как характеристики системы оказывается неудобным,

для практики желательно оценивать систему одним или несколькими числами. В свое время было предложено несколько признаков изображения линейного источника для оценки объектива: отношение освещенности в центре изображения штриха, образованного испытуемым объективом, к освещенности изображения, образованного безабберационным объективом, или расстояние от центра изображения до участков, где освещенность достигает определенного уровня [2]. Однако эти способы оценки не нашли широкого применения. В фотографии для оценки слоев широко пользуются пограничной кривой; известно несколько численных критериев оценки качества по этой кривой [3,4]. Очень широкое распространение в оптике и фотографии для оценки качества изображающих систем получил критерий, названный разрешающей способностью. Этот критерий неудобен по двум причинам: во-первых, его величина зависит от контраста решетки и, во-вторых, им трудно пользоваться для оценки сложных систем. Со времени появления в свет монографии Дюфье [5] многие исследователи оценивают изображающие системы частотно-контрастной характеристикой по синусоидальной решетке. Как правило, ограничиваются только ее вещественной частью, т. е. коэффициентом передачи контраста, хотя это строго не оправдано. Основное достоинство этого метода состоит в том, что он позволяет удобно оценивать сложные фотографические системы.

При проецировании изображения, описываемого формулой (2), на фотографический слой распределение света в нем при экспонировании подчиняется формуле

$$E''(x') = a_0 + aT_0T_s \cos 2\pi N'x' = a_0 + aT_{0s} \cos 2\pi N'x'. \quad (6)$$

Здесь

$$T_{0s} = T_0T_s, \quad (7)$$

где  $T_s$  — коэффициент передачи контраста слоя.

Смещение изображения вследствие поступательного движения носителя аэрофотоаппарата, а также его вибраций, количественно может быть также учтено коэффициентом передачи контраста.

Если геометрическое изображение линейного источника во время экспонирования смещается на расстояние  $a$ , то для распределения освещенности в фокальной плоскости получим

$$L'(x') = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{при } x < \left| \frac{a}{2} \right| \\ 0 & \text{при } x > \left| \frac{a}{2} \right| \end{cases} \quad (8)$$

и по формуле (5) для коэффициента передачи контраста

$$T(N') = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} e^{-i2\pi N'x'} dx' = \frac{\sin \pi N'a}{\pi N'a}. \quad (9)$$

Если из-за вибраций изображение линейного источника колеблется в направлении, перпендикулярном его длине, по закону

$$x = \frac{a}{2} \cos \omega t, \quad (10)$$

то для распределения освещенности линейного источника получим

$$L'(x') = \frac{2}{a\pi \sqrt{1 - \frac{4x'^2}{a^2}}} \quad (11)$$

и для коэффициента передачи контраста

$$T(N') = \int_{-\infty}^{\infty} L'(x') dx' = I_0(\pi N'a), \quad (12)$$

где  $I_0$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Формула справедлива для случая, когда период колебаний мал по сравнению с выдержкой.

Скотт [1] предлагает оценивать также коэффициентом передачи контраста влияние на результат фотографирования рассеяния света атмосферой, вызванного двумя разными причинами: атмосферной дымкой и турбулентными потоками воздуха. При этом он считает, что первое явление уменьшает контраст для всех частот в одно и то же число раз, а для коэффициента передачи контраста при втором явлении предлагает формулу

$$T(N') = e^{-2\pi^2 a^2 N'^2}.$$

Из сказанного следует, что основные элементы фотоаппарата, а также атмосферные условия можно характеризовать или функцией распределения освещенности в изображении линейного источника, или коэффициентом передачи контраста по синусоидальной решетке. И та и другая характеристики являются полными в смысле, указанном выше. Мало того, эти характеристики могут быть получены одна из другой, как это следует из формулы (5). Для оценки сложной системы по функции изображения линейного источника требуется последовательное применение известной формулы свертки

$$E'(x') = \int_{-\infty}^{\infty} E(x' - u) L'(u) du', \quad (13)$$

где  $E(x')$  — распределение яркости в тест-объекте;

$E'(x')$  — распределение освещенности в его изображении.

В случае синусоидальной решетки коэффициент передачи контраста  $T(N')$  всей системы является произведением коэффициентов передачи контраста отдельных элементов

$$T(N') = T_0(N') T_s(N'). \quad (14)$$

Эта простая зависимость характеристики всей системы от характеристик отдельных элементов составляет основное достоинство метода частотно-контрастной характеристики по синусоидальной решетке.

Заметим, что знание частотно-контрастной характеристики позволяет найти не только функции распределения света в изображении линейного источника, но и функции изображения границы прямолинейного края и П-образной решетки, а также вычислить разрешающую способность аппарата.

В литературе и на практике иногда применяют в качестве критерия коэффициент передачи контраста по П-образной решетке при определении контраста по формуле (4) и контраст изображения при определении контраста по формуле

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}}.$$

Соотношение этих критериев рассмотрено в [6].

## Коэффициенты передачи контраста фотографических объективов и материалов

Объектив. Коэффициент передачи контраста безабберационных объективов зависит от частоты решетки, длины волны света и относительного отверстия объектива и может быть вычислен по формуле

$$T_0(N') = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \lambda K N' - \lambda K N' [1 - (\lambda K N')^2]^{1/2} \right\}.$$

Таблица значений этой функции приведена в [6]. Для объективов с остаточными aberrациями коэффициент передачи контраста зависит от типа объектива и степени исправления aberrаций. Для короткофокусного объектива с относительным отверстием 1:2 в центре поля коэффициент был определен следующим методом. В фокальной плоскости коллиматора устанавливались П-образные решетки различной частоты с равной шириной прозрачных и непрозрачных штрихов. Изображение решетки, образованное испытываемым объективом, увеличивалось приблизительно в 100 раз микрообъективом с апертурным числом 0.65. Распределение освещенности в увеличенном оптическом изображении измерялось на микрофотометре, описанном в [7]. По измеренным данным вычислялся коэффициент передачи контраста  $T_{пр}$  для П-образной решетки, а затем по указанной Кольтманом [8] формуле

$$T_{\text{син.}}(N') = \frac{\pi}{4} \left[ T_{\text{пр.}}(N') + \frac{1}{3} T_{\text{пр.}}(3N') - \frac{1}{5} T_{\text{пр.}}(5N') + \frac{1}{7} T_{\text{пр.}}(7N') + \frac{1}{11} T_{\text{пр.}}(11N') - \dots \right]$$

вычислялся коэффициент передачи контраста для синусоидальной решетки. Зависимость этого последнего коэффициента передачи контраста от частоты решетки для исследованного объектива представлена на рис. 1.

Фотографический материал. Были определены коэффициенты передачи контраста двух фотографических материалов, резко отличающихся по светочувствительности и разрешающей способности.

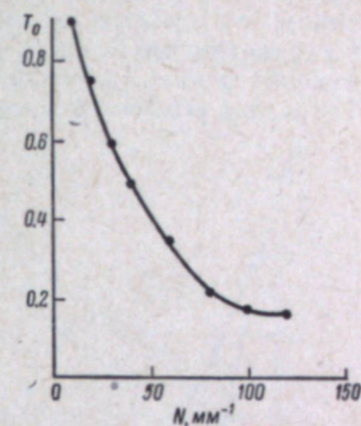


Рис. 1. Зависимость коэффициента передачи контраста  $T_0$  от частоты решетки  $N$  для объектива с относительным отверстием 1:2.

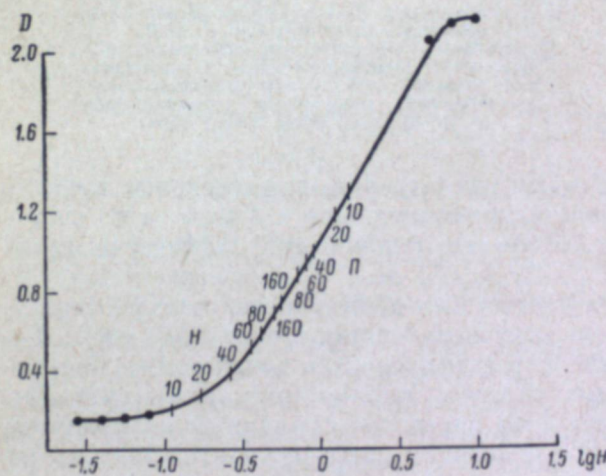


Рис. 2. Схематическая иллюстрация метода определения коэффициента передачи контраста фотографического слоя.

$N$  — частоты, отвечающие непрозрачным участкам,  $\text{мм}^{-1}$ ;  
 $\Pi$  — то же для прозрачных участков.

Метод определения состоял в следующем. На испытуемый образец контактом впечатывались стандартная решетка-мира и сенситометрический клин. Плотности почернения проявленного изображения решетки и клина измерялись на упомянутом выше микрофотометре. Затем строилась характеристическая кривая и на этот же график наносились плотности почернения светлых и темных участков изображений решетки (рис. 2). По графику определялось действующее распределение света в слое при экспонировании, вычислялся коэффициент передачи контраста для П-образной решетки и затем по формуле Кольмана — коэффициент для

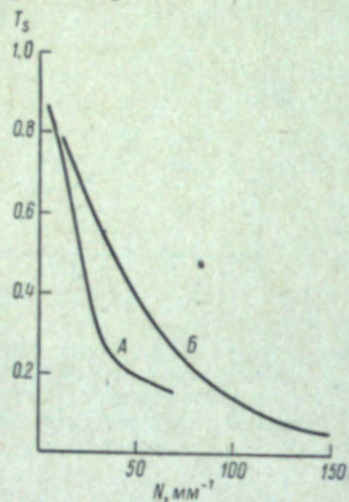


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи контраста от частоты для двух фотографических материалов, отличающихся по светочувствительности в 10—12 раз.

А — более чувствительный материал; Б — менее чувствительный материал.

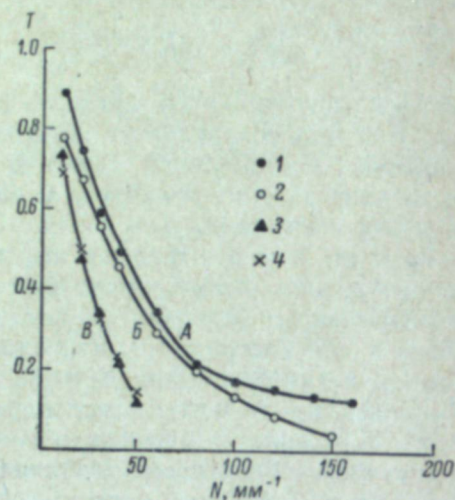


Рис. 4. Сравнение коэффициентов передачи контраста системы объектив—слой, определенных двумя способами.

А — объектив; Б — фотографический слой; В — объектив+фотографический слой. 1 — измеренные значения для объектива; 2 — измеренные значения для слоя; 3 — измеренные значения для системы объектив—слой; 4 — значения, полученные перемножением коэффициентов объектива и слоя.

синусоидальной решетки. Образцы исследованных материалов отличались по разрешающей способности приблизительно в 3 раза, а по светочувствительности — в 12 раз. Результаты измерений графически представлены на рис. 3.

Для уточнения полученных данных был проведен еще опыт по определению коэффициента передачи контраста системы объектив—слой. На той же установке решетка-мира фотографировалась испытуемым объективом на один из исследованных слоев и методом, описанным выше, по фотографическому изображению был определен суммарный коэффициент передачи контраста. Результаты измерений графически представлены на рис. 4, из которого следует, что значения коэффициента передачи контраста системы объектив—слой, полученные двумя способами, находятся в удовлетворительном согласии, за исключением частоты  $50 \text{ мм}^{-1}$ , где расхождение достигает 20%.

### Заключение

На рис. 5 даются графики зависимости коэффициента передачи контраста от частоты решетки для безабберационных объективов с относительными отверстиями 1:5 и 1:10 для красной области спектра, для объектива с остаточными aberrациями с относительным отверстием 1:2 в двух плоскостях установки, для двух фотографических материалов и

для четырех смещений изображения линейного источника вследствие несовершенства механизма компенсации сдвига изображения.

Графики дают количественное представление о влиянии отдельных элементов фотоаппарата на суммарный коэффициент передачи контраста. Из формулы (14) и графиков следует, что если для заданной частоты один из элементов аппарата имеет некий коэффициент передачи контраста, то общий коэффициент передачи контраста в лучшем случае не может

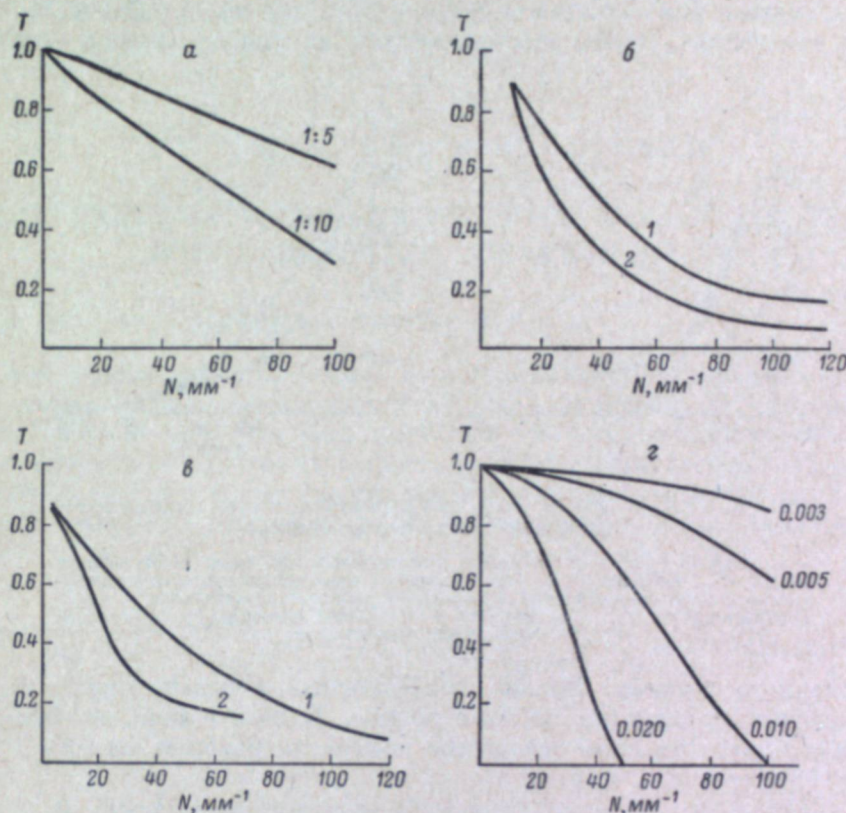


Рис. 5. Коэффициенты передачи контраста элементов фотографической системы.

а — безабберационные объективы; б — объектив с остаточными aberrациями; 1 — наилучшая плоскость установки; 2 — расфокусировка по 0.05 мм; в — светочувствительные слои: 1 — менее чувствительный материал; 2 — более чувствительный материал; г — сдвиг изображения, мм.

превышать этого значения и будет равным ему, когда другие коэффициенты равны единице. Далее из формулы и графиков следует важный практический вывод о том, что требовать в этом случае от других элементов аппарата коэффициента передачи контраста, равного единице, для больших частот бессмысленно, ибо таким путем повысить коэффициент передачи контраста всей системы для заданной частоты невозможно.

О влиянии отдельных элементов аппарата на общий коэффициент передачи контраста можно судить также по рис. 6. Кривые а и б относятся к случаю безабберационного объектива 1:5 и двух упомянутых выше слоев с учетом, что вследствие различия их чувствительности примерно в 10 раз сдвиг изображения на высокоразрешающем слое будет снижать коэффициент передачи контраста значительно сильнее, чем на грубо разрешающем слое. Из этого графика видно, что при сдвигах изображения в 2 и 20 мк применение высокоразрешающего слоя нецелесообразно. Разумеется, что при совершенном механизме компенсации сдвига изображения этот вывод теряет силу и преимущества высокоразрешающего слоя



сохраняются. Это видно, в частности, по кривым  $\epsilon$  и  $\zeta$ : применение более светосильного объектива приводит к лучшему коэффициенту передачи контраста для системы с высокоразрешающим слоем по сравнению с комбинацией «малоразрешающий слой—объектив малой светосилы».

Приведенные иллюстративные примеры показывают, что сравнительная оценка проектируемых систем может быть произведена по коэффициентам передачи контраста систем для какой-либо одной частоты. В действительности в большинстве случаев к проектируемой системе предъявляется требование, чтобы она разрешала на снимке детали местности

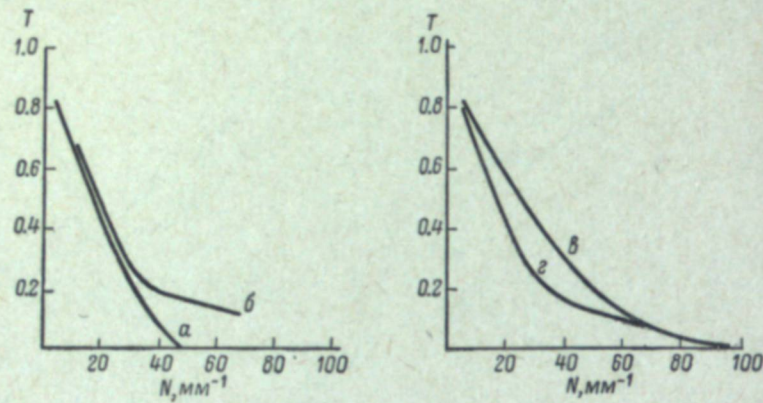


Рис. 6. Коэффициенты передачи контраста системы объектив—слой при сдвиге изображения.

$\alpha$  — объектив 1:5 — слой малой чувствительности, сдвиг изображения 20 мк;  $\beta$  — объектив 1:5 — слой высокой чувствительности, сдвиг изображения 2 мк;  $\epsilon$  — объектив 1:5 — слой малой чувствительности, сдвиг изображения 10 мк;  $\zeta$  — объектив 1:10 — слой высокой чувствительности, сдвиг изображения 3 мк.

определенного размера. Знание коэффициента передачи контраста системы позволяет ответить на этот вопрос. В самом деле, коэффициент передачи контраста есть отношение контраста изображения  $K_{и.}$  к контрасту предмета  $K_{п.}$ , т. е.

$$T(N') = \frac{K_{и.}(N')}{K_{п.}(N')}.$$

Считают, что решетка может быть опознана на снимке в том случае, если контраст ее изображения равен 0.03—0.04. Тогда последняя формула позволяет вычислить зависимость величины разрешаемого на снимке предмета от его контраста для реальных условий съемки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. Scott, Phot. Sci. a. Eng., 3, 201, 1959.
2. G. Kuwabara, JOSA, 45, 309, 1955.
3. G. C. Higgins, L. A. Jones, JSMPT, 58, 277, 1952.
4. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 195, 369, 1962.
5. P. M. Duffieux. L'Intégrale de Fourier et ses applications à l'optique. Rennes, 1946.
6. А. Т. Ащеулов, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 6, 1, 1960.
7. А. Т. Ащеулов, Т. А. Павличук, М. Д. Хухрина, Опт.-мех. промышл., 26, вып. 6, 4, 1959.
8. Coltman, JOSA, 44, 468, 1954.

А. Т. АЩЕУЛОВ, Н. П. БЕРЕЗИН

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ

### Известные способы измерения

На рис. 1 показана общая схема исследования фотографических объективов методом частотно-контрастной характеристики. Расположение основных элементов в реальных приборах часто отличается от показанного на рисунке: в некоторых схемах объектив испытывается в обратном ходе лучей, иногда в схему вводят дополнительные оптические элементы, например микрообъектив, и т. д. Мы здесь, однако, будем считать эти

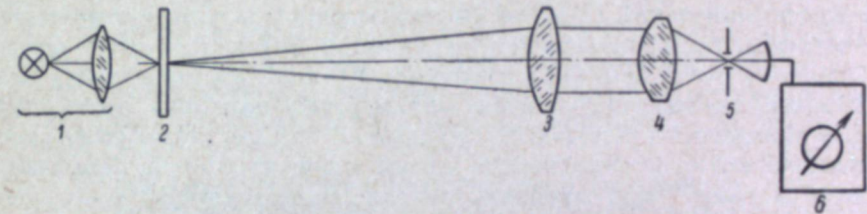


Рис. 1. Общая схема измерения частотно-контрастной характеристики объектива.

1 — осветитель, 2 — синусоидальная мира; 3 — объектив коллиматора, 4 — испытуемый объектив, 5 — щель, 6 — фотоэлектронное измерительное устройство.

различия несущественными и положим в основу рассмотрения различия, вытекающие из выбора тест-объекта.

Прямой способ измерения коэффициента передачи контраста объектива заключался бы в следующем. В фокальной плоскости коллиматора помещается мира с синусоидальным распределением коэффициента пропускания, а в фокальной плоскости испытуемого объектива — узкая щель. Измерительная схема регистрирует световой поток, прошедший через щель. Перемещая миру в собственной плоскости, определяют контраст в оптическом изображении; отнеся полученное значение к контрасту миры, получают коэффициент передачи контраста для заданной частоты штрихов.

Очевидное неудобство прямого способа связано с необходимостью оперировать мирами с синусоидальным распределением коэффициента пропускания; точное изготовление этих тестов является сложной технической задачей. Один из способов обойти указанную трудность заключается в замене синусоидальной миры маской с вырезом синусоидально меняющейся ширины. Можно показать, что если длина щели в фокальной плоскости объектива перекрывает изображение маски, то показания измери-

тельного прибора неотличимы от тех, которые были бы получены при использовании синусоидальной миры с той же частотой штрихов. Еще более интересна возможность замены синусоидальной миры обычной штриховой (с П-образным профилем штриха) при использовании избирательного электрического фильтра, который, будучи введен между фотоэлектрическим приемником и измерительным прибором, задерживает все гармонические составляющие сигнала, кроме составляющей основной частоты.

Другим недостатком исходного способа является необходимость иметь отдельную миру (или маску) для каждой интересующей частоты штрихов. Стремясь избавиться от этого недостатка, часто применяют тест-объекты переменной частоты. Проводя такой тест перед объективом, можно получить сразу всю частотно-контрастную характеристику, либо регистрируя ее с помощью самописца, либо наблюдая ее на экране осциллографа. Однако при этом теряется противоположная возможность: остановившись на определенной интересующей частоте, исследовать поведение коэффициента передачи контраста в зависимости от тех или иных факторов. Кроме того, сама переменность частоты тест-объекта является источником искажений результатов измерения в той мере, в какой она проявляется в пределах площади пятна рассеяния испытуемого объектива.

Для лабораторных исследований объективов наибольший интерес представляют способы, позволяющие производить все измерения при фиксированной частоте штрихов и при необходимости быстро менять частоту, не прибегая к замене теста. Один из них основан на том, что в систему коллиматора вводится панкратическая система. Этот способ заманчив своей простотой, однако он едва ли пригоден для серьезных измерений, поскольку панкратическая система вносит неконтролируемые искажения в результаты измерений. Другой способ связан с использованием в качестве тест-объекта вращающейся радиальной миры. При этом, являясь разновидностью теста переменной частоты, радиальная мира также вносит определенные искажения, причем двухмерный характер теста делает учет этих искажений чрезвычайно трудным. С той же двухмерностью связана повышенная чувствительность схемы к децентрировке отдельных ее элементов, а также необходимость замены в этом случае сканирующей щели малым отверстием, что сильно ограничивает световой поток и тем самым снижает точность измерений.

Особое место занимает интерференционный способ измерения коэффициента передачи контраста; весьма интересный в принципиальном отношении, он, однако, едва ли может быть рассмотрен с принятых здесь позиций.

### Примененная установка

В 1960 г. нами была построена установка для измерения коэффициента передачи контраста фотографических объективов по методу, предложенному Бэтчем [1]. Схема установки изображена на рис. 2. Посеребренный стеклянный барабан *Б*, по образующим которого прорезаны через равные интервалы узкие штрихи, приводится во вращение вокруг своей оси. Участок барабана, проходящий вблизи фокальной плоскости коллиматора *К* и освещаемый лампой *Л* на просвет, играет роль тест-объекта. Исследуемый фотографический объектив *Об* изображает тест-объект в плоскость сканирующей щели *Щ*, за которой находится фотоэлектрический приемник *ФЭУ*. Электрический сигнал, снимаемый с приемника, представляет в определенном масштабе распределение освещенности в изображении теста. Переменная составляющая сигнала проходит через избирательный электрический фильтр *Ф*, после чего регистрируется на экране электронного осциллографа *ЭО*. Постоянная составляющая измеряется

с помощью микроамперметра *МкА*. Задавая определенные скорости вращения барабана, выделяют различные гармоники периодического электрического сигнала. Их амплитуды, отнесенные к постоянной составляющей, дают значения коэффициента передачи контраста для соответствующих частот штрихов. Призма Дове *Д*, помещенная перед коллиматором, служит для имитации поворота тест-объекта в собственной плоскости. Подробное описание установки помещено в [2].

Был опробован также другой способ измерения, основанный на сочетании той же оптической схемы с электронным анализатором спектра

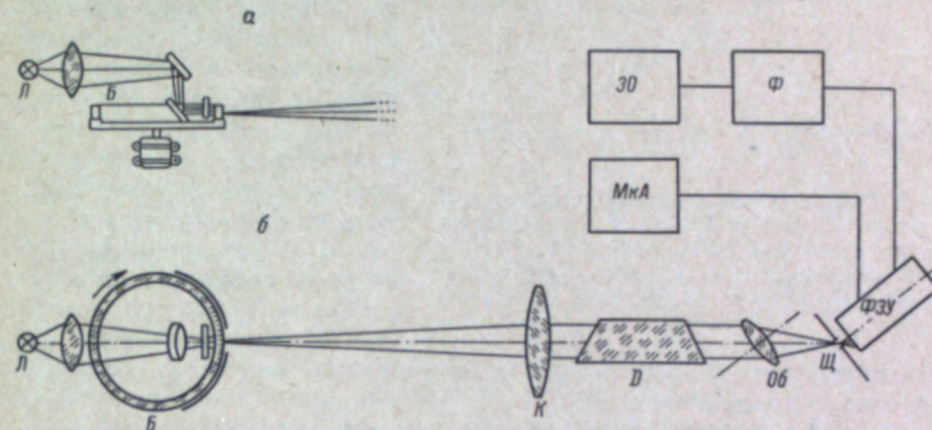


Рис. 2. Схема построенной установки.  
а — вид сбоку; б — в плане.

АСЧХ-1. Анализатор подключался к фотоэлектрическому приемнику, после чего на экране электронно-лучевой трубки можно было непосредственно наблюдать ход частотно-контрастной характеристики испытуемого объектива. Образец осциллограммы показан на рис. 3. Эта интерес-

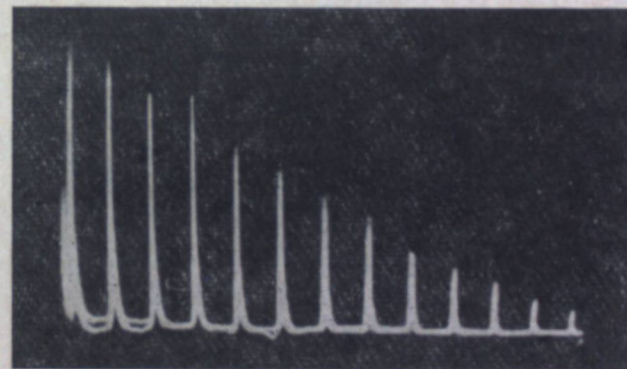


Рис. 3. Осциллограмма, полученная с электронным анализатором спектра.

ная возможность оплачивалась, однако, весьма ощутимой потерей точности, поскольку ошибки измерения на приборе АСЧХ-1 достигают  $\pm 10\%$  от амплитуды первой гармонической составляющей.

### Некоторые результаты измерений

Исследование безабберационного объектива. Для оценки достоверности результатов измерений, а также для градуировки измерительной схемы представляло интерес измерить на установке



безабберационный объектив, значения коэффициента передачи контраста для которого легко вычисляются.

С этой целью был использован объектив Юпитер-8, который диафрагмировался до малых отверстий. Для выделения узкого участка спектра применялся избирательный светофильтр с максимумом пропускания при  $\lambda = 546$  мкм. Изменения производились для различных значений частоты штрихов при нескольких относительных отверстиях.

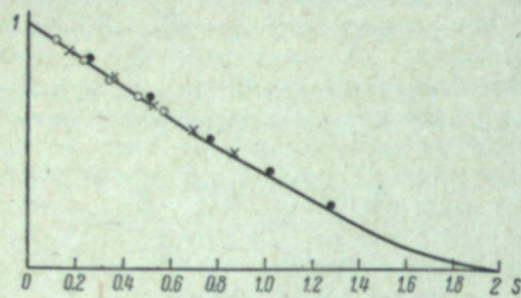


Рис. 4. Сопоставление значений коэффициента передачи объектива Юпитер-8, полученных при относительных отверстиях 1:8, 1:11 и 1:16 (соответственно, кружки, крестики и точки) с расчетными значениями (сплошная кривая).

применялся избирательный светофильтр с максимумом пропускания при  $\lambda = 546$  мкм. Изменения производились для различных значений частоты штрихов при нескольких относительных отверстиях. Сопоставление результатов измерений с расчетными данными произведено на рис. 4. Расчетная частотно-контрастная характеристика для безабберационного объектива изображена кривой  $T(S)$  где  $S$  — приведенная частота штрихов в обратных оптических единицах. Градуировочная константа измерительной схемы

была определена из того же опыта на основании результатов измерений при относительном отверстии 1:8. Полученное соответствие опытным данным теоретической кривой было признано хорошим.

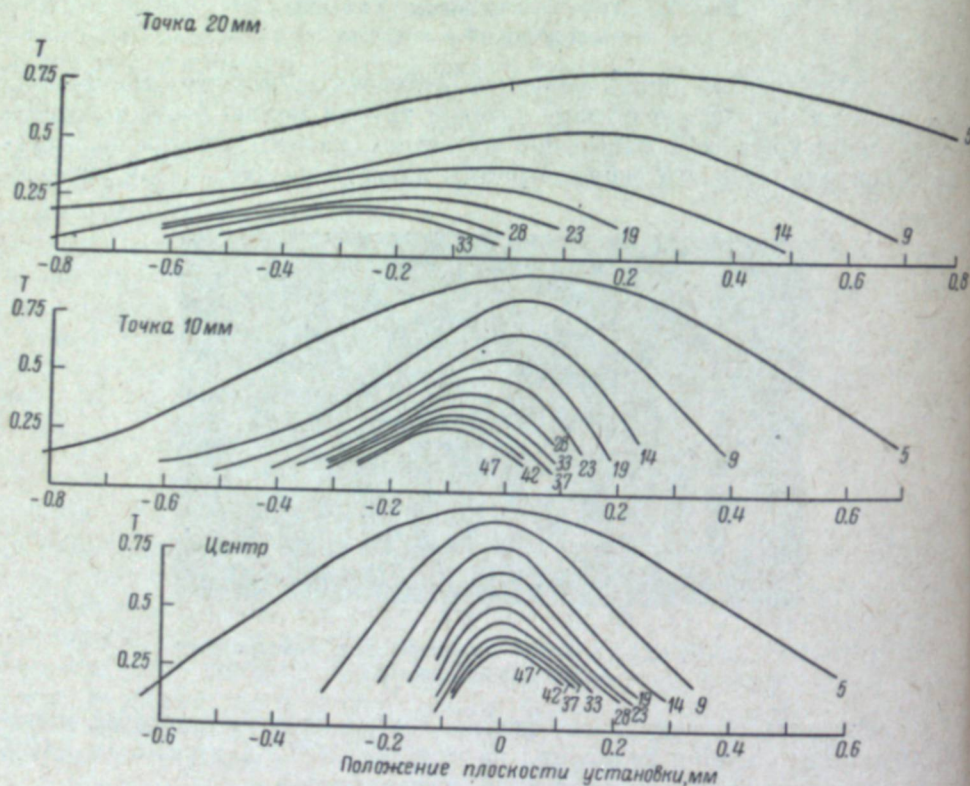


Рис. 5. Результаты исследования объектива Таир-11 при полном отверстии. Цифры при кривых — частоты,  $\text{мм}^{-1}$ .

Исследование объектива Таир-11. Эталонный образец объектива Таир-11, 1:2.8,  $f = 135$  мм, был исследован нами в ме

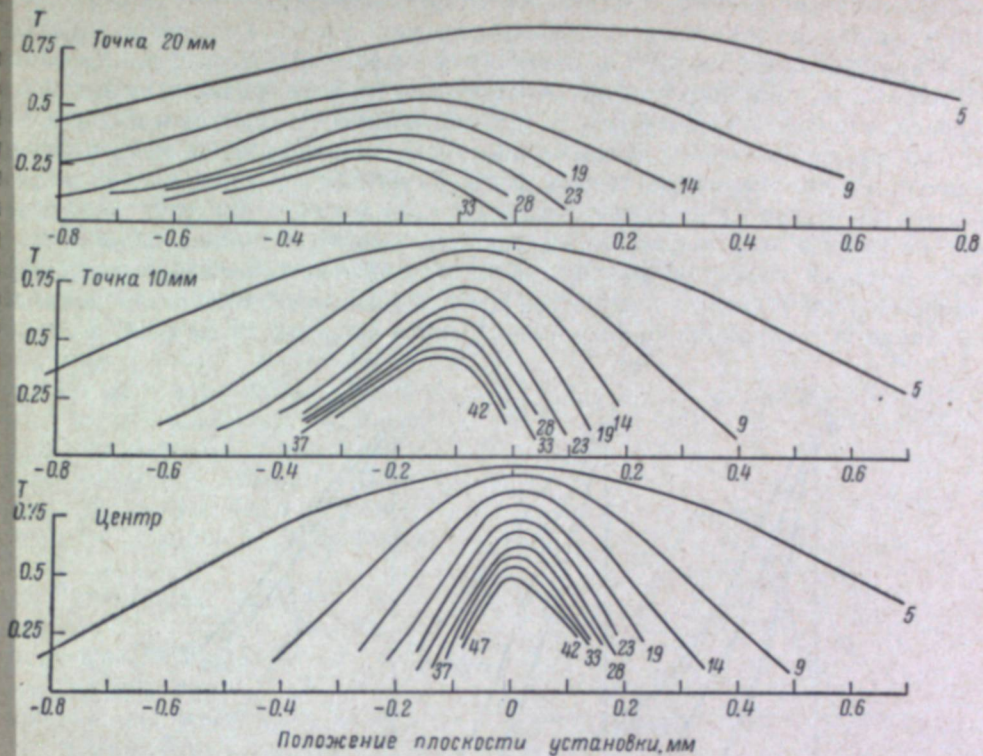


Рис. 6. Результаты исследования объектива Таир-11 при диафрагмировании до 1:4.

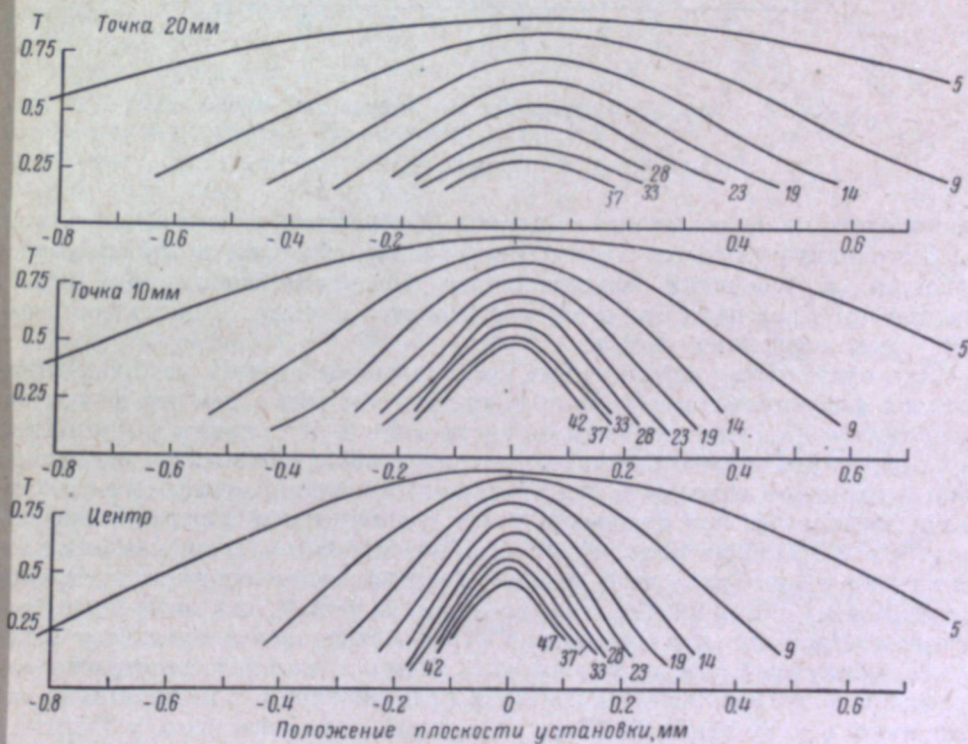


Рис. 7. Результаты исследования объектива Зоннар, 1:4;  $f = 135$  мм.

ридональном сечении при относительных отверстиях 1 : 2.8 и 1 : 4. Полученные результаты представлены на рис. 5 и 6 в виде «фокусируемых кривых», выражающих зависимость коэффициента передачи контраста от плоскости установки; числа, стоящие при кривых, указывают значения пространственной частоты ( $\text{мм}^{-1}$ ), при которых производились измерения.

На рисунках приведены данные только для одного радиуса поля зрения значения в симметричных точках поля также были измерены и оказались близкими. Легко видеть, что с увеличением частоты контраст в оптическом изображении понижается и глубина резкости становится меньше. Во внеосевых точках изменение частоты, кроме того, вызывает изменение контраста. С последним обстоятельством связано различие структуры изображения по разные стороны от фокуса, а также

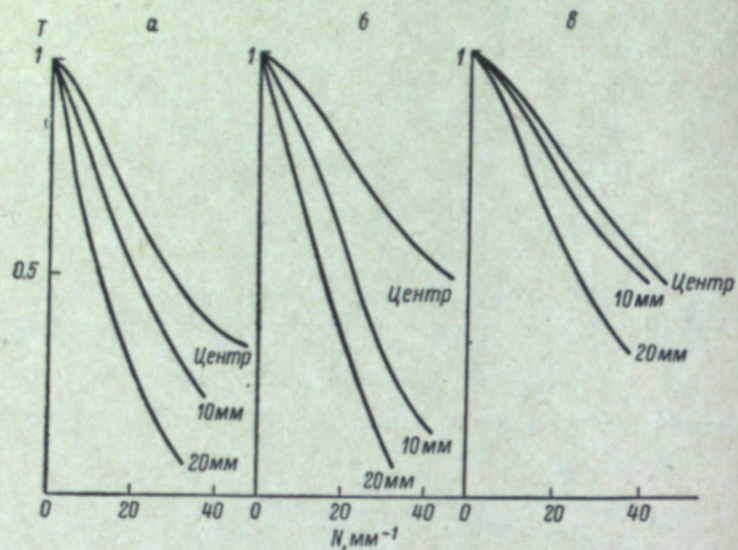


Рис. 8. Частотно-контрастные характеристики объективов Таир-11 и Зоннар.

а — Таир-11, 1 : 2.8; б — Таир-11, 1 : 4; в — Зоннар, 1 : 4.

зависимость кривизны поля от частоты. Диафрагмирование объектива до 1 : 4 несколько улучшает характеристики изображения: контраст увеличивается, а плоскости максимального контраста сдвигаются теснее. Однако кривизна поля при этом не становится меньше, а для средних частот даже несколько растет.

Для сравнения с результатами исследования Таира-11 на рис. 7 приводятся фокусируемые кривые объектива Зоннар с тем же фокусным расстоянием и с относительным отверстием 1 : 4. В то время как в центре поля структура оптического изображения у обоих объективов одинакова (при одинаковом относительном отверстии), различия между ними становятся очевидными при сравнении точек, удаленных от центра. Легко видеть, что и кривизна поля, и расхождение максимумов кривых для разных частот у Зоннара заметно меньше, а максимальные значения контраста выше. К чему это приводит, хорошо видно на рис. 8, где изображены частотно-контрастные характеристики обоих объективов в плоскости установки, наилучшей для центра поля. У Зоннара передача контраста сохраняется почти неизменной в пределах поля радиусом 10 мм и заметно падает лишь в углу кадра (в 20 мм от центра), в то время как у Таира-11 резкое падение контраста начинается уже при небольших удалениях от центра. К сожалению, отсутствие данных о передаче контраста обоими

объективами в сагиттальном сечении не позволяет довести их сравнение до конца.

Исследование объектива Гелиос-40. Результаты исследования телевизионного варианта объектива Гелиос-40, 1 : 1.5,  $f=85$  мм, помещены на рис. 9. Объектив рассчитан на применение с двумя плоско-параллельными пластинами, что было учтено при испытании. Поскольку главная задача здесь представляла оценка передачи контраста при частоте порядка  $40 \text{ мм}^{-1}$ , все измерения были произведены именно для этого случая. Объектив исследовался в меридиональном сечении, при различных степенях диафрагмирования, начиная с полного отверстия и кончая диафрагмой 1 : 8.

Приводимые графики позволяют проследить эволюцию фокусируемых кривых при диафрагмировании объектива, причем легко можно видеть, как изменяются в каждой точке поля максимальное значение коэффициента передачи, положение плоскости наибольшего контраста и глубина резкости. Интересно, что уже при относительном отверстии 1 : 8 кривые для всех точек поля оказываются подобными; это говорит о том, что влияние аберраций объектива при таком диафрагмировании почти полностью устраняется, хотя кривизна поля в принципе остается.

Наборы графиков, подобные приведенным, могут быть полезны, например, при выборе наиболее выгодных установок диафрагмы. Так, анализируя помещенные здесь кривые, можно сделать вывод, что в рассматриваемом нами случае не имеет смысла диафрагмировать объектив до отверстий 1 : 2 или 1 : 2.8, так как потеря светосилы при этом никак не окупается незначительным повышением контраста; если же признано необходимым улучшить передачу контраста, то нужно стараться довести диафрагмирование по крайней мере до 1 : 4.

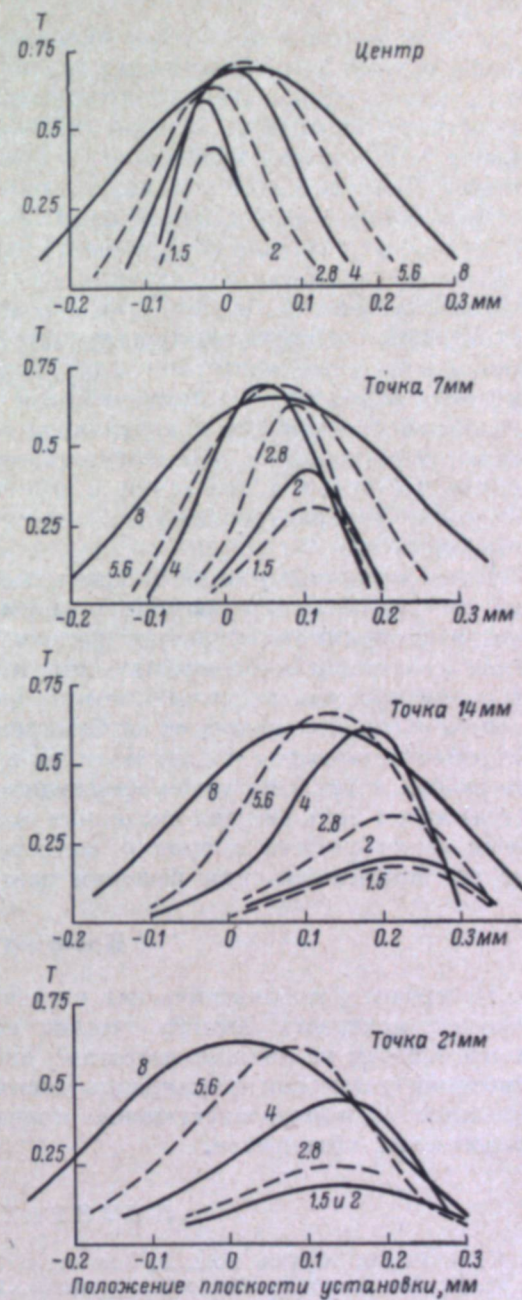


Рис. 9. Результаты исследования объектива Гелиос-40. Цифры при кривых — знаменатели относительного отверстия.

Частота штрихов в изображении —  $40 \text{ мм}^{-1}$ .

Метод частотно-контрастной характеристики, рассматриваемый здесь как определенный метод исследования и оценки фотографических объектов, имеет характерные черты, с которыми связаны и способы его применения.

Для того чтобы полностью определить свойства оптического изображения, образуемого объективом в заданной точке поля и в данном сечении необходимо располагать соответствующими частотно-контрастной и фазовой характеристиками. Однако при решении большинства технических задач столь большая информация о свойствах изображения является излишней. Теоретический анализ, а также существующий опыт оценки объективов методом разрешающей способности дают все основания полагать, что измерение значений коэффициента передачи при одной разумно выбранной частоте окажется достаточным для решения таких, например, задач как оценка качества центрировки объектива, контроль объективов в цеху нахождения плоскости наилучшего изображения и т. д. Даже в таком узком виде метод частотно-контрастной характеристики имеет ряд преимуществ перед широко применяемыми в настоящее время методами разрешающей способности и визуальной оценкой. Эти преимущества определяются точностью и объективностью оценки, возможностью свободного выбора частоты, т. е. той точки, в которой контролируется ход частотно-контрастной характеристики, и простотой автоматизации измерительного процесса.

В тех случаях, когда необходимо иметь полное описание изображительных свойств объектива, например при изучении опытного образца, могут измеряться полные частотно-контрастные и фазовые характеристики. Набор таких характеристик полностью определяет лицо объектива и позволяет проанализировать, насколько он пригоден для решения той или иной задачи, чего можно ожидать от комбинирования его с тем или иным фотографическим материалом и т. д. Если же требования к объективу и условия его работы могут быть точно сформулированы, то в этом случае (и только тогда) может быть введена численная оценка объектива, которая позволяет обоснованно решать вопрос о том, какую из рассматриваемых систем следует предпочесть для решения данной задачи.

### Выводы

Построена фотоэлектрическая установка для измерения коэффициента передачи контраста фотографических объективов. Выбор измерительной схемы основан на анализе известных способов измерения. Испытание построенной установки подтвердило достоверность получаемых на ней результатов. С помощью установки произведено исследование ряда фотографических объективов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. K. Birch, Optica Acta, 5, hors serie, 271, 1958.
2. Н. П. Березин, Опт.-мех. промышл., 28, вып. 11, 29, 1961.

Р. А. КРАСКОВСКИЙ

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНТРОПИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ ФИГУР РАССЕЯНИЯ

### Введение

В настоящее время решение ряда технических задач так или иначе сопряжено с применением оптических систем, иногда весьма сложных и дорогостоящих. Эта сложность часто является следствием недостаточной полной оценки роли оптической системы в решении той или иной задачи и вытекающих из этого чрезмерных требований к качеству изображения, даваемого системой. Оценка свойств оптического изображения имеет также важное значение при передаче его на расстояние с помощью средств радио и телевидения. В этих случаях оптическая система является частью сложного канала передачи информации и, по-видимому, оценка свойств изображений, даваемых такими системами, должна производиться в терминах теории информации.

Задачей настоящей работы является оценка эффективных размеров фигур рассеяния и оценка свойств оптического изображения с точки зрения передачи его по каналам связи. Решение этой задачи проводится на основе вычисления энтропии оптических изображений.

### Энтропия оптического изображения

Изображение, даваемое оптической системой, т. е. некоторое распределение освещенности в плоскости изображений определяется, как известно, следующим уравнением [1, 2]:

$$E'(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} B(x' - x, y' - y) E(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где  $E'(x', y')$  и  $E(x, y)$  — распределения освещенностей соответственно в плоскости изображений и в плоскости предметов;  $B(x', y')$  — аппаратная функция системы [2], иначе говоря, фигура рассеяния. Уравнение (1) есть свертка функций и может быть заменено эквивалентным уравнением

$$G'(\omega_1, \omega_2) = Y(\omega_1, \omega_2) G(\omega_1, \omega_2), \quad (2)$$

в котором новые функции находятся с помощью интеграла Фурье

$$G'(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E'(x, y) e^{-i(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy,$$

$$G(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) e^{-i(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy,$$

$$Y(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(x, y) e^{-i(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy,$$

где  $\omega_1 = 2\pi\nu_1$  и  $\omega_2 = 2\pi\nu_2$ .

Из уравнения (2) следует, что функция  $Y(\omega_1, \omega_2)$  есть функция передачи, или частотно-контрастная характеристика оптической системы. Заметим, что функция  $Y(\omega_1, \omega_2)$  в отношении описания свойств оптической системы математически эквивалентна функции  $B(x', y')$ , что следует из свойств преобразования Фурье.

Рассмотрим теперь вопрос о том, каким образом свойства оптического изображения могут быть описаны на языке теории информации.

В теории информации для описания свойств сообщений, вероятность появления которых заданы ( $p_i$ ), вводится понятие энтропии [3, 4] величина которой определяется по формуле

$$H = - \sum_i p_i \lg p_i,$$

где  $H$  — энтропия сообщения;  $p_i$  — вероятность  $i$ -того сообщения.

При этом должно выполняться условие нормировки

$$\sum_i p_i = 1.$$

Переходя к рассмотрению оптических изображений, будем полагать, что различные распределения освещенности в плоскости предметов представляют собой световые сигналы или сообщения и что вероятности этих сообщений одинаковы. Если при этом число различных сообщений равно  $N$  то очевидно, что вероятность одного сообщения равна  $p_i = \frac{1}{N}$  и, следовательно, энтропия таких сообщений, определяемая по формуле (4), равна

$$H = \lg N.$$

Число  $N$  возможных различных сообщений можно подсчитать следующим образом [3]. Пусть в плоскости предметов имеется  $n$  точек отсчета в которых производится измерение освещенности. Различного рода «шумы» налагают ограничения на точность измеряемой в данной точке отсчета величины сигнала, в данном случае — освещенности. Не вдаваясь в детальное изучение как природы сигнала, так и источников «шума», что не входит в задачу настоящей работы, мы, исходя из сказанного, предположим, что в каждой точке отсчета освещенность может принимать  $L$  различных дискретных значений. Тогда число возможных различных сообщений

$$N = L^n.$$

Число точек отсчета  $n$  определим на основании теоремы отсчетов [3] которая гласит: если функция  $E(x)$  не содержит составляющих с частотой

выше  $W$ , то она полностью определяется последовательностью ее значений в точках, отстоящих на расстоянии  $\frac{1}{2} W$  друг от друга. Это означает, что мы фактически ограничиваемся рассмотрением только таких функций распределения освещенности в плоскости предметов, которые удовлетворяют теореме отсчетов. Приведенная формулировка теоремы отсчетов относится к случаю одной переменной, однако, как показал Бриллюэн [5], эта теорема может быть обобщена также на случай многих переменных. Используя теорему отсчетов, находим, что интервалы между точками отсчетов равны  $\Delta x = \frac{1}{2} W_1$  вдоль оси  $X$  и  $\Delta y = \frac{1}{2} W_2$  вдоль оси  $Y$ ; если рассматриваемая область плоскости предметов — прямоугольник со сторонами  $a$  и  $b$ , то число точек отсчета приблизительно равно

$$n = 4W_1 W_2 ab.$$

Заметим, что число различных градаций освещенности может быть, в частности, принято равным интервалу освещенностей рассматриваемого объекта

$$L = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}.$$

Таким образом, энтропия сообщений на входе оптической системы равна

$$H = 4W_1 W_2 ab \lg L. \quad (5)$$

Далее, мы можем вычислить потери энтропии, возникающие в оптической системе, рассматриваемой в качестве линейного фильтра с известной функцией передачи  $Y(\nu_1, \nu_2)$ . В самом деле, потеря энтропии в линейном фильтре, согласно Голдману [3], вычисляется следующим образом:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \lg |Y(\nu_{1i}, \nu_{2j})|, \quad (6)$$

где  $n_1 = 2W_1 a$  и  $n_2 = 2W_2 b$ .

Если  $n_1 \gg 1$  и  $n_2 \gg 1$ , то можем положить  $\Delta\nu_1 = \frac{W_1}{n_1}$  и  $\Delta\nu_2 = \frac{W_2}{n_2}$ , и тогда сумма (6) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{n_1 n_2}{W_1 W_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \lg |Y(\nu_{1i}, \nu_{2j})| \Delta\nu_1 \Delta\nu_2 \approx \\ &\approx \frac{n_1 n_2}{W_1 W_2} \int_0^{W_1} \int_0^{W_2} \lg |Y(\nu_1, \nu_2)| d\nu_1 d\nu_2. \end{aligned}$$

Подставляя значения  $n_1$  и  $n_2$ , найдем, что величина потерь энтропии в оптической системе равна

$$\Delta H = 4ab \int_0^{W_1} \int_0^{W_2} \lg |Y(\nu_1, \nu_2)| d\nu_1 d\nu_2. \quad (7)$$

С другой стороны, заметим, что число градаций освещенности в плоскости изображений  $L'$  может не совпадать с числом  $L$  градаций освещенности в плоскости предметов. В частности, учитывая, что освещенность в плоскости изображений [6] связана с освещенностью на предмете соотношением

$$E' = E \tau \sin^2 u' + E_{\text{васв.}}$$

(где  $E_{засв.}$  — освещенность в плоскости изображений, создаваемая всякого рода посторонними засветками;  $\tau$  — коэффициент пропускания;  $u'$  — апертурный угол оптической системы), находим число градаций освещенности в плоскости изображений

$$L' = \frac{E_{\max} \tau \sin^2 u' + E_{засв.}}{E_{\min} \tau \sin^2 u' + E_{засв.}}$$

Аналогично выражению (5) получим для сообщений на выходе (без учета потерь в оптической системе) величину энтропии

$$H'_0 = 4W_1 W_2 ab \lg L'.$$

Учитывая величину потерь энтропии в оптической системе, определяемую выражением (7), получим окончательно, что энтропия сообщений на выходе оптической системы, или энтропия изображений, равна

$$H' = 4W_1 W_2 ab \left\{ \lg L' + \frac{1}{W_1 W_2} \int_0^{W_1} \int_0^{W_2} \lg |Y(v_1, v_2)| dv_1 dv_2 \right\}. \quad (8)$$

В выражении (8) под логарифмом стоит величина  $L' |Y(v_1, v_2)|$ , определяющая число градаций, поэтому  $L' |Y(v_1, v_2)| \geq 1$  и, следовательно, интегрирование в формуле (8) должно производиться по всей области, где  $|Y(v_1, v_2)| \geq \frac{1}{L'}$ . Однако ниже мы применим другой способ вычисления энтропии, основанный на том, что функция  $Y(v_1, v_2)$  практически достаточно быстро стремится к нулю.

Заметим, что формула (8) справедлива и для сложного передающего канала (например, системы объектив + пленка), если функция передачи сложного канала может быть представлена [1] как произведение соответствующих функций для отдельных частей передающего канала, а именно

$$Y(v_1, v_2) = \prod_{k=1}^i Y_k(v_1, v_2).$$

Для случая одной переменной (одномерное изображение) аналогично предыдущему получим

$$H'_1 = 2Wa \left( \lg L' + \frac{1}{W} \int_0^W \lg |Y(v)| dv \right).$$

Обратимся к рассмотрению соотношения (8), определяющего величину энтропии изображения. Легко видеть, что энтропия изображения зависит от частот  $W_1$  и  $W_2$ , ограничивающих спектр функций распределения освещенностей в плоскости предметов. С ростом величин  $W_1$  и  $W_2$ , определяющих ширину полосы спектра указанных функций, первое слагаемое в соотношении (8)  $H'_0 = 4W_1 W_2 ab \lg L'$  вызывает возрастание энтропии изображения  $H'$ , а второе слагаемое, отрицательное, учитывающее потери энтропии в системе,  $\Delta H = 4ab \int_0^{W_1} \int_0^{W_2} \lg |Y(v_1, v_2)| dv_1 dv_2$ , вызывает убывание энтропии изображения  $H'$ . Это убывание происходит вследствие того, что между выбранными нами точками отсчета в плоскости предметов корреляция, по-видимому, полностью отсутствует, в то время как в изображении между указанными точками отсчета возникает кор-

реляция, вызываемая аппаратной функцией. Следовательно, можно предположить, что величина энтропии изображения, рассматриваемая как функция ширины полосы частот  $W_1$  и  $W_2$ ,

$$H' = H'(W_1, W_2)$$

имеет максимум при некоторых значениях  $W_{1\max}$  и  $W_{2\max}$ , определяемых из решения следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial H'}{\partial W_1} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial H'}{\partial W_2} = 0.$$

Полученное таким образом значение энтропии изображения

$$H' = H'(W_{1\max}, W_{2\max}).$$

Таким образом, величина  $H'$  может, по-видимому, служить оценкой свойств изображения с точки зрения передачи его по каналу связи. В некоторых случаях может оказаться полезным вместо величины  $H'$  рассматривать величину

$$h' = \frac{H'}{ab}, \quad (9)$$

которую мы назовем плотностью энтропии изображений. Плотность энтропии изображения, как это легко понять, есть функция расстояния  $y'$  от центра рассматриваемой площадки  $ab$  изображения до оптической оси системы, т. е.

$$h' = h'(y').$$

Знание величины  $h'$  позволяет вычислить эффективные размеры фигуры рассеяния. Это делается следующим образом. Если в плоскости изображений освещенность может принимать, как мы предположили,  $L'$  различных значений, то энтропия одной точки изображения равна

$$h_0 = \lg L'$$

и тогда эффективное сечение фигуры рассеяния

$$\sigma = \frac{h_0}{h'(y')}. \quad (10)$$

Ниже будут рассмотрены простые примеры, иллюстрирующие применение полученных здесь формул.

Заметим, что выражение (8) определяет энтропию одного сигнала, и если оптическая система передает эти сигналы во времени, то пропускная способность [3] оптического канала передачи определится как

$$v = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda^2} c H',$$

где  $v$  — пропускная способность канала, измеряемая числом единиц информации в единицу времени;  $c$  — скорость света;  $\lambda$  — длина световой волны для основного цвета;  $\lambda_2 - \lambda_1$  — область ахроматизации.

### Примеры

Пример 1. Предположим, что некоторая оптическая система характеризуется фигурой рассеяния

$$B(x', y') = \frac{a_1 a_2}{\pi} e^{-a_1^2 x'^2 - a_2^2 y'^2};$$

при этом

$$\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha_1^2 x^2 - \alpha_2^2 y^2} dx dy = 1.$$

Тогда, согласно (3), находим функцию передачи, которая оказывается равной

$$Y(v_1, v_2) = e^{-\frac{\pi^2 v_1^2}{\alpha_1^2} - \frac{\pi^2 v_2^2}{\alpha_2^2}}.$$

Далее, вычисляя по формуле (8) величину энтропии изображения, получим

$$H' = 4W_1 W_2 ab \left[ \lg L' - \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{W_1^2}{\alpha_1^2} + \frac{W_2^2}{\alpha_2^2} \right) \right]. \quad (11)$$

Находя частные производные  $\frac{\partial H'}{\partial W_1}$  и  $\frac{\partial H'}{\partial W_2}$  и приравнявая их нулю, получаем следующую систему уравнений:

$$\lg L' - \frac{\pi^2 W_1^2}{\alpha_1^2} - \frac{\pi^2 W_2^2}{3\alpha_2^2} = 0.$$

$$\lg L' - \frac{\pi^2 W_1^2}{3\alpha_1^2} - \frac{\pi^2 W_2^2}{\alpha_2^2} = 0.$$

Решив эту систему уравнений, получим

$$W_{1 \max} = \frac{\alpha_1}{2\pi} \sqrt{3 \lg L'} \quad \text{и} \quad W_{2 \max} = \frac{\alpha_2}{2\pi} \sqrt{3 \lg L'}.$$

Подставляя эти значения в (11), находим величину энтропии изображения

$$H' = \frac{3\alpha_1 \alpha_2 ab}{2\pi^2} \lg^2 L';$$

плотность энтропии изображения при этом, согласно (9), равна

$$h' = \frac{3\alpha_1 \alpha_2}{2\pi^2} \lg^2 L'.$$

Полагая, что энтропия изображения точки

$$h_0 = \lg L',$$

найдем по формуле (10) эффективное сечение фигуры рассеяния

$$\sigma = \frac{2\pi^2}{3\alpha_1 \alpha_2 \lg L'}. \quad (12)$$

Принимая в качестве основания логарифмов число 2 и подставляя в (12)  $\alpha_1 = \alpha_2 = 10 \text{ мм}^{-1}$  и  $L' = 8$ , находим, что  $\sigma = 0.02 \text{ мм}^2$ .

Проводя аналогичные выкладки для одной переменной, найдем, что эффективный диаметр фигуры рассеяния равен

$$\delta = \frac{3\pi}{4\alpha_1 \sqrt{\lg L'}}. \quad (13)$$

Для приведенных выше данных  $\delta = 0.13 \text{ мм}$ .

Пример 2. Рассмотрим теперь вопрос о том, каким образом определяются эффективные размеры фигур рассеяния для сложного канала передачи через эффективные размеры фигур рассеяния отдельных его частей.

Пусть сложный канал имеет функцию передачи

$$Y_0 = Y_1(v) Y_2(v),$$

где

$$Y_1 = e^{-\frac{\pi^2 v^2}{\alpha_1^2}} \quad \text{и} \quad Y_2 = e^{-\frac{\pi^2 v^2}{\alpha_2^2}}, \quad (14)$$

так что

$$Y_0 = e^{-\frac{\pi^2 v^2}{\alpha_1^2} - \frac{\pi^2 v^2}{\alpha_2^2}} = e^{-\frac{\pi^2 v^2}{\alpha_0^2}},$$

где

$$\frac{1}{\alpha_0^2} = \frac{1}{\alpha_1^2} + \frac{1}{\alpha_2^2}. \quad (15)$$

Воспользовавшись формулой (13), находим

$$\delta_0 = \frac{3\pi}{4\alpha_0 \sqrt{\lg L'}}$$

или, так как из (15) следует, что

$$\alpha_0 = \left( \frac{1}{\alpha_1^2} + \frac{1}{\alpha_2^2} \right)^{-\frac{1}{2}},$$

получим

$$\delta_0 = \frac{3\pi}{4 \left( \frac{1}{\alpha_1^2} + \frac{1}{\alpha_2^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\lg L'}}.$$

Далее, для отдельных частей сложного канала аналогично предыдущему находим

$$\delta_1 = \frac{3\pi}{4\alpha_1 \sqrt{\lg L'}}$$

и

$$\delta_2 = \frac{3\pi}{4\alpha_2 \sqrt{\lg L'}}.$$

Сопоставляя величины  $\delta_0$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , находим, что в данном случае справедливо соотношение

$$\delta_0^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2. \quad (16)$$

Однако легко показать, что характер зависимости (16) изменится, если вместо функций передачи, определяемых соотношением (14) положить

$$Y_1 = e^{-\frac{|v|}{\beta_1}} \quad \text{и} \quad Y_2 = e^{-\frac{|v|}{\beta_2}}. \quad (17)$$

При этом величины  $\delta_0$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_2$  равны

$$\delta_0 = \frac{1}{\beta_0 \lg L'}; \quad \delta_1 = \frac{1}{\beta_1 \lg L'}; \quad \delta_2 = \frac{1}{\beta_2 \lg L'}.$$



Вместо соотношения (16) получим

$$\delta_0 = \delta_1 + \delta_2. \quad (18)$$

Таким образом, характер соотношений вида (16)—(18), выражающих зависимость эффективных размеров фигур рассеяния для сложного канала от эффективных размеров фигур рассеяния для отдельных его частей, меняется в зависимости от характера функций  $Y_1(v)$  и  $Y_2(v)$ , т. е. в конечном счете зависит от распределения энергии в фигуре рассеяния. Однако необходимо отметить, что зависимости типа (16)—(18) весьма устойчивы, а полученное здесь значительное различие указанных соотношений вызвано сильным изменением характера рассматриваемых функций передачи (14) и (17).

### Выводы

1. Найдена общая зависимость эффективных размеров фигур рассеяния от заданного числа градаций освещенности и распределения энергии в фигуре рассеяния.

2. Установлено, что оценка свойств изображения с точки зрения передачи его по каналам связи может быть произведена на основе подсчета энтропии изображения  $H'$  или на основе определения плотности энтропии изображения  $h'$ .

В заключение автор выражает глубокую признательность проф. Д. С. Волосову и Л. А. Халфину за проявленное внимание к работе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Давенпорт, В. Л. Рут. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. ИЛ, М., 1960.
2. С. Г. Раутиан, Усп. физ. наук, 66, 475, 1958.
3. С. Голдман. Теория информации, ИЛ, М., 1957.
4. А. М. Яглом, И. М. Яглом. Вероятность и информация. Физматгиз, М., 1960.
5. Л. Бриллюэн. Наука и теория информации. Физматгиз, М., 1960.
6. Д. С. Волосов, М. В. Цивкин. Теория и расчет светооптических систем проекционных приборов. Изд. «Искусство», М., 1960.
7. А. Т. Ащеулов, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 6, 1 и вып. 7, 10, 1960.

В. А. МАТВЕЕВ

### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ ПО УГЛОВОМУ ПРЕДЕЛУ РАЗРЕШЕНИЯ

Существует весьма распространенное представление, что чем больше фокусное расстояние объектива фотоаппарата, тем более мелкие подробности фотографируемой местности можно различать в изображении на негативах, получаемых с одной и той же высоты, и что для достижения одинаковой дешифрируемости негативов, получаемых в условиях отсутствия сдвигов изображения, фокусное расстояние аппарата должно увеличиваться прямо пропорционально высоте фотографирования. Основой этого представления является обратная зависимость между угловым пределом разрешения объективов и величиной фокусного расстояния.

Нашей задачей было выявить, насколько подчиняются вышеуказанной зависимости наиболее типичные линзовые длиннофокусные аэрофотообъективы, если их сравнивать при одном и том же угловом поле зрения.

В качестве критерия для сравнительной оценки способности различных объективов с различными фокусными расстояниями давать информацию совместно с фотографическим слоем о наименьших по размерам деталях фотографируемого сюжета была принята средняя весовая по площади квадратного кадра угловая разрешающая сила в обратных радианах  $\bar{\Theta}$ .

$$\bar{\Theta} = 2\bar{R}f, \quad (1)$$

где  $\bar{R}$  — средняя весовая по площади квадратного кадра при заданном угловом поле разрешающая сила в  $\text{мм}^{-1}$ ;  $f$  — фокусное расстояние, мм.

Термину «средняя весовая по площади квадратного кадра угловая разрешающая сила в обратных радианах» для упрощения в дальнейшем присвоено наименование *добротность*.

Зная добротность объектива, можно определить средний размер  $A$  детали на местности, находящейся на пределе разрешения,

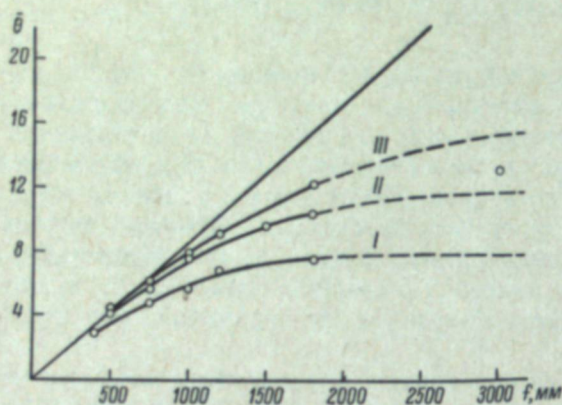
$$A = \frac{H}{k\bar{\Theta}}, \quad (2)$$

где  $H$  — высота фотографирования;  $k$  — численный коэффициент.

Сравнительной оценке было подвергнуто 15 различных эталонных образцов объективов с фокусными расстояниями от 400 до 3000 мм. Их параметры приведены ниже:

Фокусное расстояние, мм	Отн. отверстие
400	1 : 6.3
500	1 : 6.3; 1 : 4.5
750	1 : 6.3
1000	1 : 7
1200	1 : 8
1500	1 : 10
1800	1 : 8
3000	1 : 10

Фотографические испытания образцов на разрешающую силу по полю были проведены при строго одинаковых условиях. Съемки производились на оптической скамье с пятиметровым коллиматором при оранжевом светофильтре. В фокусе коллиматора находилась радиальная глубинная мишень с контрастом, равным единице. Фотографическим материалом являлся Панхром X. Измерение полученных резольвограмм и построение графиков разрешающей силы были выполнены одними и теми же лицами, не



Добротности различных объективов при угловом поле зрения  $13.5^\circ$ .

участвовавшими в последующей обработке материалов. Затем по данным полученных графиков для всех объективов были определены средние весовые разрешающие силы при поле зрения по диагонали квадратного кадра, равном 20, 16 и  $13.5^\circ$ .

Определение средней весовой разрешающей силы производилось графическим суммированием. Квадратный кадр, соответствующий заданному угловому полю зрения объектива, разбивался концентрическими окружностями на ряд зон. Ширина зоны всегда

$$\bar{R} = \frac{\sum S_i R_i}{S}, \quad (3)$$

устанавливалась не более 1 см. Каждой зоне приписывалась, согласно графику, своя средняя разрешающая сила. Средняя весовая разрешающая сила определялась из выражения

где  $S_i$  — площадь  $i$ -той зоны;  $R_i$  — разрешающая сила на  $i$ -той зоне;  $S$  — площадь кадра.

Вычисление добротности объектива производилось простым умножением средней весовой разрешающей силы на удвоенное фокусное расстояние.

На рисунке кружками представлены определенные описанным выше способом добротности сравниваемых объективов при угловом поле зрения  $2\beta = 13.5^\circ$ . По оси  $x$  отложено фокусное расстояние в мм; по оси  $y$  — числа, пропорциональные добротности.

Как видно из рисунка, почти все точки добротности можно соединить между собой тремя плавными кривыми. При ближайшем рассмотрении оказалось, что каждая кривая объединяет объективы, в основе конструкции которых лежит одна и та же оптическая схема. Кривая I относится к четырехлинзовым телеобъективам, кривая II — тоже к четырехлинзо-

вой системе, но с другим характером исправления aberrаций, кривая III объединяет объективы типа анастигмат и телеобъектив, содержащие в своей конструкции по 6 линз. Кривые добротности при угловом поле зрения  $16$  и  $20^\circ$  имеют тот же характер, что и при поле  $13.5^\circ$ , и поэтому здесь не приводятся.

Из рассмотрения полученных кривых следует, что добротность в общем случае зависит от оптической схемы, лежащей в основе конструкции объектива, от величины фокусного расстояния и от угловой величины поля зрения. У всех испытанных систем объективов рост добротности происходит примерно пропорционально росту фокусного расстояния только до некоторого, сравнительно небольшого фокусного расстояния (500—750 мм). Выше этого расстояния возрастание добротности замедляется. Интерполяция хода кривых на большие фокусные расстояния показывает, что у системы I, например, рост добротности при поле зрения  $13.5^\circ$  практически прекращается уже при фокусных расстояниях выше 1800 мм, у системы II — при фокусных расстояниях выше 2500—3000 мм, и у системы III — при фокусных расстояниях выше 3500—4500 мм. Уменьшение угла поля зрения до  $6-7^\circ$  несколько смещает эти границы в сторону больших фокусных расстояний, но не очень существенно.

Отмеченная выше зависимость непропорционального роста добротности длиннофокусных линзовых объективов с увеличением фокусного расстояния в последнее время была подтверждена на ряде других объективов. Например, для пятилинзового объектива с фокусным расстоянием 3000 мм ожидаемая величина добротности при поле зрения  $13.5^\circ$  должна была лежать где-то между кривыми II и III для этого фокусного расстояния. Так оно в действительности и получилось (см. рисунок).

Обращает на себя внимание принципиальное соответствие наших результатов результатам работы Селвина и Тирла [1, 2]. При анализе материалов фотографических испытаний большого числа объективов с фокусными расстояниями от 125 до 1400 мм упомянутые авторы пришли к заключению, что независимо от конструктивных особенностей и системы объектива средняя угловая разрешающая сила по полю в обратных радианах растет с увеличением фокусного расстояния пропорционально корню квадратному из фокусного расстояния. Соответствие в результатах мы усматриваем в установлении самого факта непропорционального роста средней угловой разрешающей силы с увеличением фокусного расстояния, а не в количественной оценке такой непропорциональности. Совершенно очевидно, что для установления такой оценки, допускающей достоверное предсказание, необходимы исследования с привлечением значительно более длиннофокусных объективов, чем те, которыми располагали и мы, и указанные выше авторы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. W. H. Selwyn, J. L. Tearle, Proc. Phys. Soc., 58, 493, 1946.
2. Г. К. Брок. Физические основы аэрофотографии. ИЛ, М., 1958.

Ф. С. НОВИК, М. М. ЩЕГЛОВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВОЙ РЕЗКОСТИ, ДАВАЕМОЙ КИНОСЪЕМОЧНЫМИ ОБЪЕКТИВАМИ

### Введение

Применяемые в настоящее время методы исследования кино съемочных объективов в лабораторных условиях не могут достаточно полно характеризовать качество фотографического изображения этих объективов.

Как известно, наиболее распространенным количественным методом оценки качества кино съемочного или фотографического объектива является метод определения фотографической разрешающей силы, выражающейся предельно разрешаемым числом штрихов на миллиметре.

Однако одно лишь определение фотографической разрешающей силы, особенно у объективов, обладающих большими значениями остаточных aberrаций, недостаточно характеризует качество фотографического изображения. Практика показывает, что два кино съемочных объектива, обладающих одинаковым значением предела разрешения, могут оказываться совершенно различными в эксплуатационных условиях.

Следует также отметить, что в ряде случаев плоскость, в которой кино съемочный объектив дает наиболее резкое изображение, не является плоскостью максимальной фотографической разрешающей силы.

Поэтому наряду с критерием «фотографическая разрешающая сила» имеет хождение самостоятельное понятие «качество изображения», по которому понимается то, как передаются или рисуются исследуемые объективом контуры снимаемых объектов. При этом даются следующие определения изображения: четкое, мягкое, сочное, размытое, резкое, бриллиантное и т. п. Совершенно очевидно, что такие определения субъективны, неточны и спорны.

В связи с этим в НИКФИ и на киностудии «Мосфильм» под руководством авторов проводятся экспериментальные работы по новым методам объективной оценки качества изображения, даваемого кино съемочными объективами.

### Краткий обзор

Как известно, зарубежные исследователи Гольдберг и Джонс, Хиггинс и Вольф [1, 2] и советские исследователи О. А. Герасимова [3], Г. А. Истомина [4], Ю. Н. Гороховский и Ю. К. Вифанский [5] и другие проводили работы по объективной оценке качества фотографического изображения, в основу которой положена так называемая пограничная

кривая. Было показано, что визуальное восприятие и оценка резкости фотографического изображения определяются функцией распределения оптической плотности на краю изображения в направлении, перпендикулярном границе. Эта функция  $D=f(x)$  выражается кривой, названной пограничной.

На рис. 1 показана пограничная кривая: она состоит из прямолинейной части и двух закруглений (плечо и пятка).

Для характеристики субъективного восприятия фотографического изображения было предложено несколько способов оценки формы пограничной кривой.

Гольдбергом было предложено производить оценку резкости изображения по наклону прямолинейной части пограничной кривой  $G = \frac{dD}{dx}$ .

Джонс и Хиггинс предложили оценивать форму пограничной кривой с помощью среднего квадратичного градиента

$$(G_x^2) = \frac{1}{x_b - x_a} \int_A^B \left( \frac{dD}{dx} \right)^2 dx.$$

Вифанский и Гороховский предложили оценивать резкость фотографического изображения производением максимального градиента на максимальную разность плотностей.

Однако существенным недостатком указанных способов оценки резкости фотографического изображения является отсутствие учета характера закруглений пограничной кривой, играющих весьма существенную роль в качестве формируемого изображения.

### Методика работы

Нами была принята методика исследования объективов по краевой резкости.

Совершенно очевидно, что наибольший интерес представляет характеристика объектива в совокупности с пленкой. В связи с этим получение изображения полуплоскости целесообразно было объединить с одновременным получением на пленке изображения радиальных миры. Это обеспечивает одинаковые условия фотографирования и позволяет проводить сравнение фотографической разрешающей силы с резкостью, определяемой по пограничной кривой.

На рис. 2 показана схема испытательного щита для исследования объективов, предназначенных для съемки нормальных и широкоэкранных фильмов. Щит состоит из двух рядов радиальных просветных миры. В нижнем ряду на 3 мирах, в одной плоскости с фотографическим слоем радиальных миры, укреплены по вертикали специально изготовленные бритвенные лезвия длиной 200 мм. В верхнем ряду показаны радиальные анаморфированные миры для исследования анаморфотных кино съемочных блоков и насадок, в которых лезвия укреплены как по вертикали, так и по горизонтали.

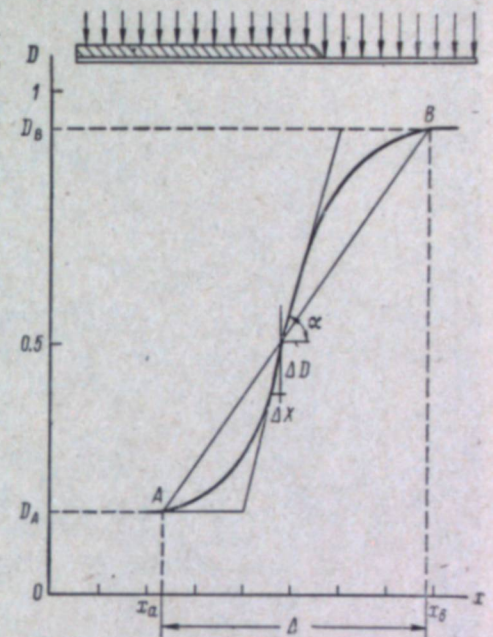


Рис. 1. Пограничная кривая распределения почернения.

Фотографическая съемка и обработка производились в одинаковых условиях согласно нормам машиностроения МН65-59 [6], в которых приведены состав проявителя и режим обработки до достижения  $\gamma=0.55$  и  $D=0.8 \pm 0.05$ .

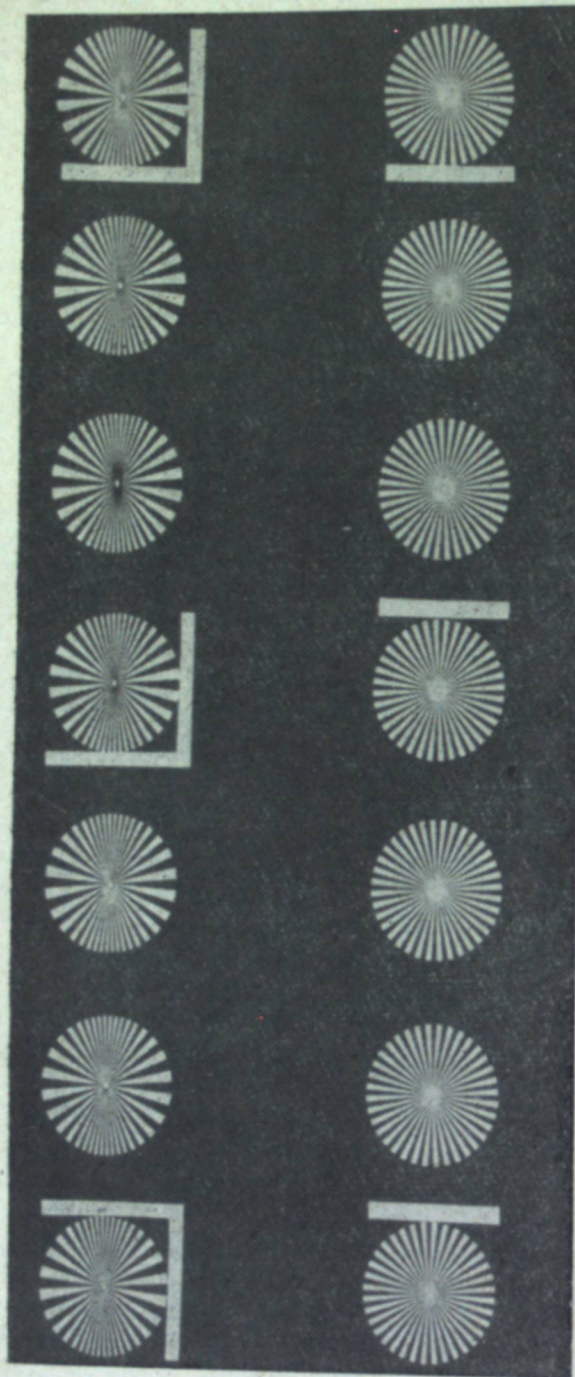


Рис. 2. Схема испытательного щита.

Проявленные пленки обрабатывались на микрофотометре МФ-4 с пучком света или без него. Отсчеты по барабану. Параметры регистрации негативного изображения полуплоскости были выбраны следующие: масштаб записи 1 : 300, ширина оптической щели (с учетом увеличения) 0.0025 мм, высота 0.6 мм, отклонение светового индекса гальванометра составляет 1 деление (1/10 от шкалы), скорость записи 10 мм/мин.

При фотометрировании изображения плоскости без регистрации были выбраны следующие параметры: ширина оптической щели 0.05 мм, высота 0.5 мм. Отсчеты производились через каждые 0.005 мм.

При измерениях обращалось внимание на то, чтобы край фотографического изображения был параллелен изображению измерительной щели микрофотометра, так как их непараллельность влияет на наклон пограничной кривой.

Графики пограничной кривой строились в масштабе 1000 : 1 для  $\Delta$  (протяженность зоны нерезкости) и 100 : 1 для  $D$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

При исследовании объективов были выбраны наиболее часто применяемые в практике киносъемки объективы трех фокусных расстояний: короткофокусные с  $f=18$  мм, среднефокусные с  $f=50$  мм и длиннофокусные с  $f=75$  мм.

В целях сравнения объективов различных конструкций нами взяты объективы типа ОКС, выпускаемые Ленинградским заводом киноаппаратуры, а также объективы французской фирмы Киноптик и английской фирмы Тейлор, Тейлор и Гобсон.

Результаты исследований приведены в виде графиков пограничной кривой (рис. 3—5) для центра кадра (сплошная линия) и для края (пунктирная линия). По оси ординат отложена плотность  $D$ , а по оси абсцисс — расстояние  $x$  в пределах зоны нерезкости, выраженное в микрометрах. Для сравнения в нижней части рисунков под каждым графиком приведены кривые фотографической разрешающей силы объективов.

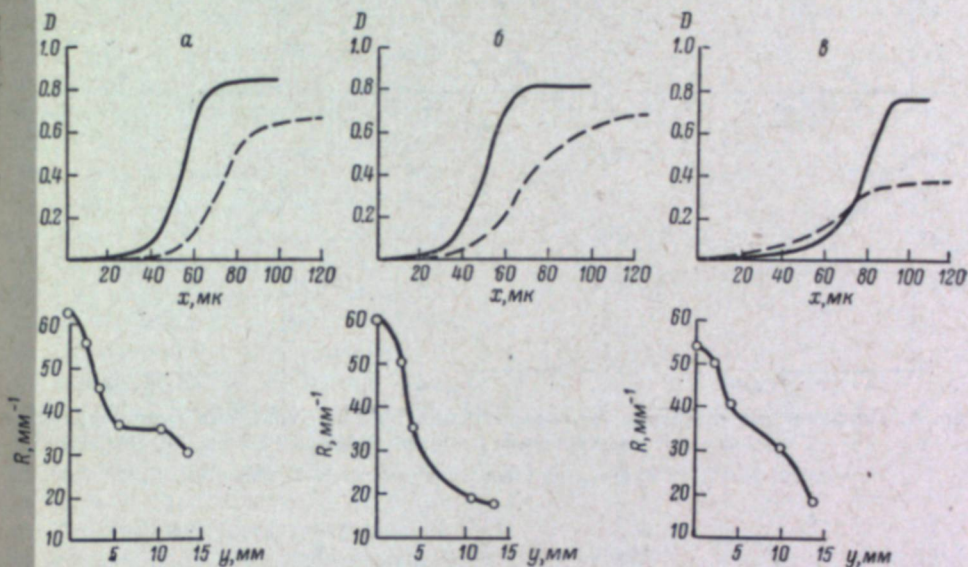


Рис. 3. Пограничные кривые и фотографическая разрешающая сила киносъемочных объективов с фокусными расстояниями  $f=18$  мм.

а — РО71-1, 1 : 2.8; б — Кук Спид Панхро, 1 : 1.7; в — Ретрофокус, 1 : 2.2.

На рис. 3 приведены графики киносъемочных объективов РО71-1,  $f=18$  мм, 1 : 2.8; Ретрофокус,  $f=18.5$  мм, 1 : 2.2, и Кук Спид Панхро,  $f=18$  мм, 1 : 1.7.

Из графиков видно, что при полном относительном отверстии наилучшим является объектив РО71-1, а наихудшим — объектив Ретрофокус. Между тем по фотографической разрешающей силе объектив Ретрофокус несколько лучше объектива Кук.

На рис. 4 приведены графики киносъемочных объективов ОКС1-50-1у,  $f=50$  мм, 1 : 2; Киноптик,  $f=50$  мм, 1 : 2 и Кук Спид Панхро,  $f=50$  мм, 1 : 2.

Следует отметить, что объектив ОКС1-50-1у обладает весьма незначительным преимуществом по сравнению с объективом Кук, если учесть пограничную кривую на краю кадра. Объектив Киноптик уступает указанным объективам в отношении вида пограничной кривой и фотографической разрешающей силы на краю кадра.

На рис. 5 приведены графики киносъемочных объективов ОКС1-75-1у,  $f=75$  мм, 1 : 2; Киноптик,  $f=75$  мм, 1 : 2 и Кук Спид Панхро,  $f=75$  мм, 1 : 2.

Из графиков видно, что наилучшим объективом и по пограничной кривой, и по фотографической разрешающей силе является объектив Кук. Объектив Киноптик как по пограничной кривой, так и по фотографической

ской разрешающей силе на краю кадра уступает объективам Кук ОКС1-75-1у.

В таблице приведены результаты экспериментального исследования объективов.

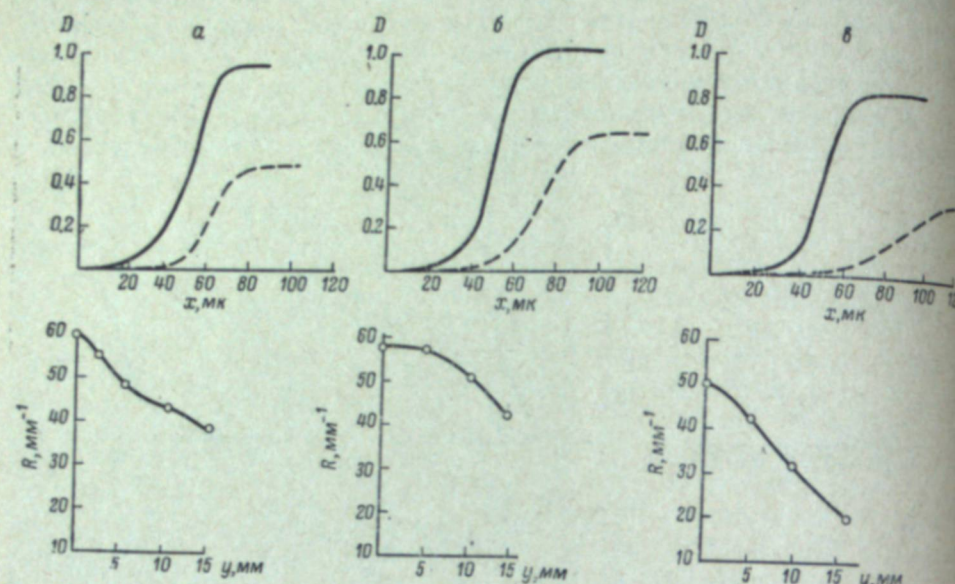


Рис. 4. Пограничные кривые и фотографическая разрешающая сила киносъемочных объективов с фокусными расстояниями  $f = 50$  мм.

а — ОКС1-50-1у, 1 : 2; б — Кук Спид Панхро, 1 : 2; в — Киноптик, 1 : 2.

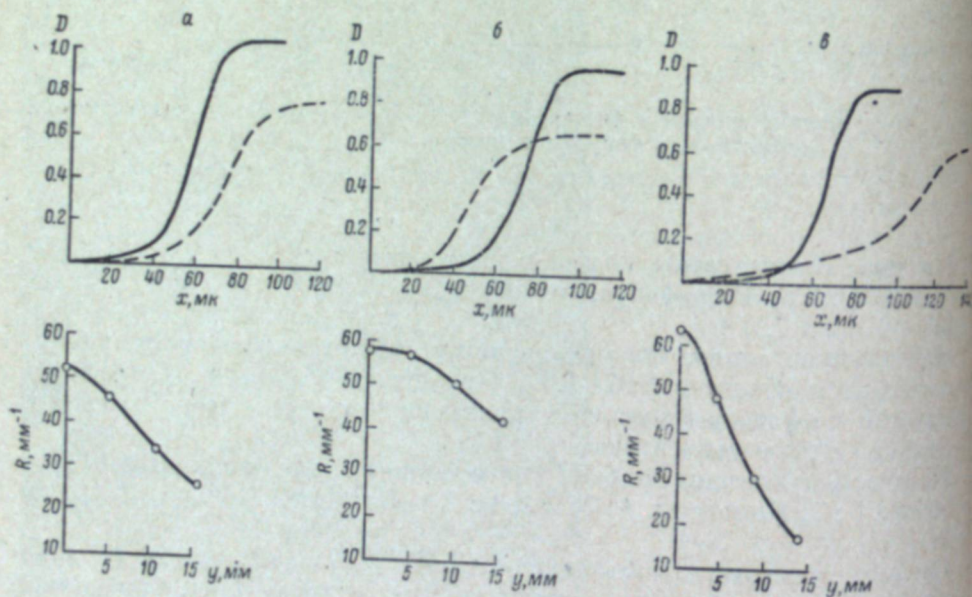


Рис. 5. Пограничная кривая и фотографическая разрешающая сила киносъемочных объективов с фокусными расстояниями  $f = 75$  мм.

а — ОКС1-75-1у, 1 : 2; б — Кук Спид Панхро, 1 : 2; в — Киноптик, 1 : 2.

Из рисунков и таблицы следует, что киносъемочные объективы типа Кук и ОКС по резкости и фотографической разрешающей силе очень близки. Между тем объективы Киноптик заметно уступают другим указанным объективам. Такой вывод подтверждается также и результатами эксплуатационных испытаний объективов при киносъемке.

Значительный интерес представляет также определение характера передачи объективом глубины снимаемого объекта, что является дополнительной характеристикой киносъемочного объектива [7]. В связи с этим было исследовано изменение пограничной кривой для выяснения характера передачи киносъемочным объективом глубинного пространства.

На рис. 6 показаны графики изменения пограничной кривой киносъемочного объектива ОКС1-50-1,  $f = 50$  мм, 1 : 2 для центра кадра в зависимости от расстояния до испытательного щита в пределах от 1 до 15 м при постоянной фокусировке на расстояние, равное 5 м. Для каждого расстояния предварительно измеренная величина фотографической разрешающей силы указана соответствующим числом под каждой кривой.

Из приведенных графиков видно, что пограничная кривая представляет в достаточной степени тонкую характеристику передачи объективом на пленке полуплоскости. При этом, надо полагать, важными признаками резкости изображения являются не только протяженность зоны нерезкости, но и наклон прямолинейного участка, а также конфигурация изгиба верхнего и нижнего закруглений пограничной кривой.

Для упрощения в первом приближении можно принять для количественного выражения резкости наиболее важную характеристику — протяженность зоны нерезкости, которую можно соответствующим образом измерить.

Для построения графика, могущего количественно выразить глубину резко изображаемого пространства, нами была введена по аналогии с фотографической разрешающей силой величина

$$P = \frac{1}{\Delta},$$

где  $\Delta$  — полная протяженность зоны нерезкости (см. рис. 1).

Сводка результатов исследований киносъемочных объективов

Наименование объектива	Фокусное расстояние $f$ , мм	Относительное отверстие	Угол поля зрения $2\beta$	Изготовитель	Разрешающая сила, $\text{мм}^{-1}$		Протяженность зоны нерезкости, МК		Тангенс угла наклона пограничной кривой		Радиус закругления пограничной кривой, мм	
					центр	край	центр	край	центр	край	нижнего (палка)	верхнего (палец)
РО71-1	18	1:2.8	74°08'	Ленкипп	60	29	76	66	2.2	3.4	29	31
Кук Спид Панхро	18	1:1.7	74 08	Тейлор, Тейлор и Гобсон	60	18	106	79	2.2	3.4	47	47
Ретрофокус	18.5	1:2.2	72 40	Авженье	53	18	110	84	1.4	3.1	28	21
ОКС1-50-1у	50	1:2	30 26	Ленкипп	59	38	76	76	0.8	2.8	50	64
Кук Спид Панхро	50	1:2	30 26	Тейлор, Тейлор и Гобсон	57	44	88	45	2.1	3.1	87	26
Киноптик	50	1:2	30 26	Тейлор, Тейлор и Гобсон	50	24	73	104	0.7	3.3	33	30
ОКС1-75-1у	75	1:2	20 33	Ленкипп	51	28	74	81	2.0	3.5	42	15
Кук Спид Панхро	75	1:2	20 33	Тейлор, Тейлор и Гобсон	57	44	77	77	2.0	2.7	33	17
Киноптик	75	1:2	20 33	Киноптик	63	17	240	74	1.5	3.5	40	23

На рис. 7 представлены графики глубины резко изображаемого объективом ОКС1-50-1 пространства по критериям фотографической разрешающей силы  $R$  и величины, обратной протяженности зоны нерезкости, выраженной в  $\text{мм}^{-1}$ . При этом фокусировка произведена на расстоянии при эффективном относительном отверстии 1 : 2.3 и 1 : 4.

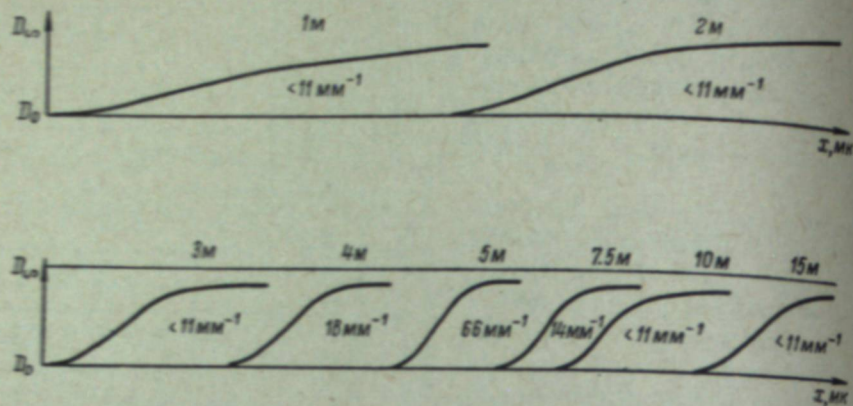


Рис. 6. Изменение пограничной кривой объектива ОКС1-50-1,  $f = 50$  мм, 1 : 2 в зависимости от расстояния до испытательного щита для центра кадра.

В отличие от кривой, характеризующей резкость, например, при диафрагме 1 : 4, разрешающая сила на расстоянии 10 м по сравнению с максимумом падает в 4 раза, тогда как резкость — только в 1.4 раза. Для одной из коротких дистанций, например 3 м, разрешающая сила падает в 7 раз, а резкость только в 1.7 раза. Особенно же характерно является сохранение высокого уровня резкости за задней геометрической

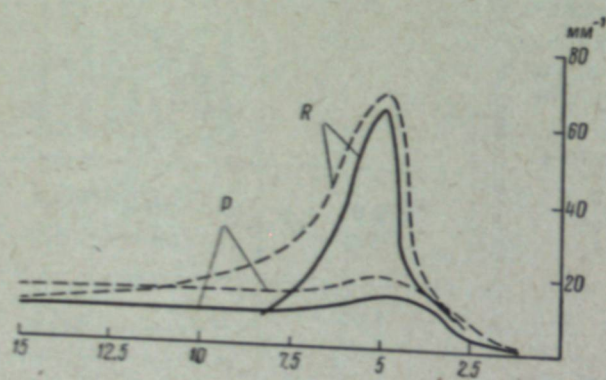


Рис. 7. Глубина резко изображаемого пространства по критериям фотографической разрешающей силы  $R$  и величины, обратной протяженности зоны нерезкости,  $P$  для объектива ОКС1-50-1 при относительных отверстиях 1 : 2.3 (сплошные линии) и 1 : 4.0 (прерывистые линии).

границей глубины резко изображаемого пространства. Это иллюстрируется изображениями светящихся точки и щели, снятыми с помощью микроскопа при увеличении  $150\times$  на дистанциях от 3 до 15 м с постоянной фокусировкой на дистанцию 5 м (рис. 8).

## Выводы

1. Пограничная кривая применена для оценки качества изображения, даваемого системой объектив—пленка. Метод оценки качества изображения, даваемого кино съемочным

представляет интерес при проведении исследования объективов в лабораторных условиях. Дополняя ряд других общепринятых критериев, он позволяет сделать надежные выводы о качестве изображения в условиях, приближающихся к практическим результатам использования объективов при кино съемке.

2. Выбор того или иного признака пограничной кривой остается пока еще недостаточно ясным и требует дальнейшего экспериментального

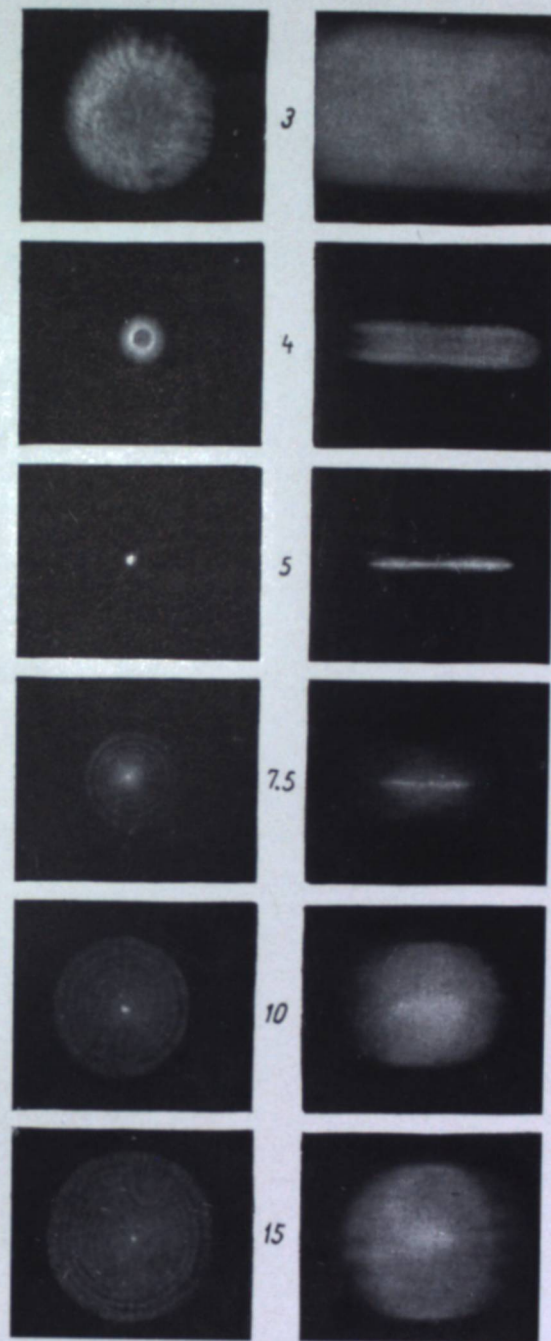


Рис. 8. Изображение точки и щели на разных дистанциях съемки (в метрах). Понаводка произведена на дистанцию 5 м.

тверждения. Во всяком случае следует учитывать характер верхнего и нижнего закруглений пограничной кривой. По нашему мнению, для характеристики качества фотографического изображения в первом приближении может быть использована величина протяженности зоны нерезкости.

3. Установлено, что измеренные величины протяженности зоны нерезкости и угла наклона прямолинейной части пограничной кривой часто не находятся в прямом соответствии с величинами фотографической разрешающей силы исследуемых объективов.

Авторы выражают признательность Л. М. Гловой и Н. В. Егоровой за участие в проведении экспериментальных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

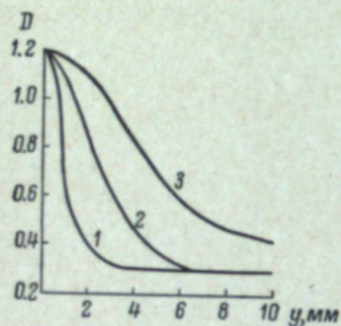
1. G. Higgins, L. Jones, JSMPTE, 58, 277, 1952.
2. G. Higgins, R. Wolfe, JSNPTE, 65, 26, 1956.
3. О. А. Герасимова, Тр. ЦНИИГАиК, вып. 107, 95, 1955.
4. Г. А. Истомин. Техника кино и телевид., 5, вып. 2, 1—12, 1951.
5. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 290—296, 369—379, 1962.
6. МН65—59. Нормаль машиностроения. Измерение фотографической разрешающей силы. Стандартгиз, М., 1959.
7. А. В. Гальперин. Глубина резко изображаемого пространства при кино- и фотосъемке. Изд. «Искусство», М., 1958.

А. Л. ЯРИНОВСКАЯ

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КИНОСЪЕМОЧНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ПО КРИТЕРИЮ РЕЗКОСТИ

(АВТОРЕФЕРАТ)

Применяемая в настоящее время количественная оценка оптического изображения величиной визуальной разрешающей силы малоприменима для определения качества киносъемочных объективов. Самым серьезным недостатком, ограничивающим применение этой величины, является то,



Пограничные кривые объективов, дающих изображения разного качества.

1 — хорошее изображение,  $S=11\%$ ; 2 — удовлетворительное изображение,  $S=23\%$ ; 3 — плохое изображение,  $S=52\%$ .

что визуальная разрешающая сила киносъемочных объективов уменьшается с уменьшением относительного отверстия, тогда как известно, что фотографическая разрешающая сила, как и действительное качество изображения, при рациональном диафрагмировании становится выше.

Критерием качества оптического изображения предлагается принять величину, названную пограничной нерезкостью и учитывающую распределение освещенности в изображении на границах светлого и темного полей. Начало разработки указанного способа оценки изображения, применяющегося на киностудии «Мосфильм», относится к 1956 г.

На черно-белую негативную пленку типа АМ испытываемым объективом с помощью микрофотонасадки фотографируется тест-объект, помещенный в фокальной плоскости коллиматора с фокусным расстоянием 1200 мм. Увеличение микрофотонасадки составляет  $280\times$  для кинообъективов с  $f=16\div 50$  мм и  $140\times$  для объективов с  $f=75\div 150$  мм. Тест-объект представляет собой круглое равномерно освещенное отверстие, разделенное по диаметру лезвием бритвы.

Негативный материал обрабатывается в производственных условиях из ряда кадров, полученных при различных экспозициях, выбирается имеющий в засвеченной части плотность  $1.2 \pm 0.05$ . Эта плотность обеспечивает достаточную чувствительность изменения пограничной нерезкости, а также удобное соотношение верхнего и нижнего пределов плотности для большинства объективов.

Измерение плотностей негатива в перпендикулярном направлении производится на микрофотометре МФ-4 при щели  $0.5 \times 5$  мм

и увеличении  $21\times$ ; отрезок на негативе, для которого измеряются плотности, считая от последней точки, где  $D=1.2$ , составляет 10 мм.

Для удобства при обработке результатов применяется бланк, где по оси ординат откладывается  $D$ , а по оси абсцисс — расстояния на негативе  $y$  (мм) от нуля (последней перед спадом точки на негативе, где  $D=1.2$ ) до очередной точки, в которой происходит измерение плотности.

Количественная оценка полученной в результате пограничной кривой производится следующим образом. Площадь, лежащая ниже пограничной кривой, выражается в процентах от всей площади (без вуали) и является количественной оценкой нерезкости  $S$  оптического изображения. Оценка по площади в какой-то степени автоматически включает в себя такие факторы, как наклон кривой, зону нерезкости и перепад плотностей. Точность определения зависит от качества изображения: абсолютная ошибка колеблется от 1 до 5%.

На рисунке представлены пограничные кривые для объективов с хорошим, удовлетворительным и плохим качеством изображения. Наряду с оценкой по площади следует обращать внимание на характер кривой. Так называемое мягкое изображение характеризуется быстрым падением плотности в начале и медленным в конце. Такое изображение быстро улучшается при небольшом диафрагмировании. Нерезкое изображение, трудно исправляемое диафрагмированием, характеризуется медленным спадом плотности в начале и более быстрым в конце.

При диафрагмировании нерезкость падает, а фотографическая разрешающая сила возрастает до оптимальных диафрагм  $1:5.6-1:8$ . Последующее диафрагмирование увеличивает нерезкость и уменьшает фотографическую разрешающую силу.

Объективы, имеющие  $S=10-15\%$ , дают изображения хорошего качества. Эти величины характерны для центра поля, особенно при диафрагмировании. Для края поля допускаются заметно большие величины. Для удовлетворительного качества характерно значение  $S=20-30\%$ . Неудовлетворительное качество проявляется, как правило, при  $S>30\%$ .

Метод оценки качества оптического изображения при помощи пограничных кривых был опробован на большом количестве киносъемочных и проекционных объективов. Результаты дали вполне удовлетворительное соответствие с оценками объективов по фотографическому изображению.



Ф. С. НОВИК, А. П. АКСЕНЧИКОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИНОСЪЕМОЧНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

### Введение

До настоящего времени в лабораторной практике отсутствует объективный метод оценки качества изображения, даваемого киносъемочным объективом.

В течение сравнительно длительного времени считалось, что фотографическая разрешающая сила объектива и графики aberrаций являются хорошим критерием его качества. Однако разрешающая сила является не единственным фактором, ограничивающим способность объектива передавать информацию. Наряду с разрешающей силой большое значение имеют оценки качества изображения по резкости, контрастности, хроматической коррекции и степени равномерности освещенности в плоскости изображения.

Одним из объективных фотоэлектрических методов, представляющих значительный интерес, является измерение частотно-контрастной характеристики объектива.

В 1934 г. Мертц и Грей [1] при исследовании процесса передачи изображений в телевидении и фотографии впервые применили двумерное разложение Фурье для описания распределения яркости объекта и передаваемого видеосигнала. В 1946 г. Дюфье [2] применил интеграл Фурье в теории передачи оптического изображения. Почти одновременно Шапиро [3] применил объективные методы для измерения характеристик и разрешающей способности оптических систем, фотографических слоев телевизионных трубок. С помощью разработанного им телевизионного микрофотометра были получены характеристики телевизионной системы эквивалентные функции передачи контраста, которую начали применять в последнее время в оптике.

В настоящее время на базе этих идей опубликовано свыше 60 научных работ, библиографию которых частично можно найти в обзоре Ф. Перена [4]. В обзорной статье Рудольфа [5] приводится общий ход рассуждений, позволяющих прийти к определению функции передачи контраста.

Для экспериментального измерения передачи контраста разработано ряд методов и приборов, которые подробно описаны в нашей литературе А. Т. Ащеуловым [6], О. А. Герасимовой [7], Н. П. Березиным [8] и др. Из зарубежных работ последнего времени надо указать на статьи [9] и [10].

В 1960—1961 гг. в НИКФИ Ф. Новиком и Н. Тельновым была разработана и изготовлена экспериментальная установка для измерения частотно-контрастной характеристики киносъемочных объективов, принципиальная схема которой, близкая к описанной в статьях Линдберга [11] и Ингельстама [12], приведена на рис. 1.

В качестве источника света использована ксеноновая лампа 1 типа ДКсШ-1000, питающаяся постоянным током 50 а от мотора — генератора. Пучок света, пройдя через трехлинзовый конденсор 2, освещает точечную диафрагму 3 диаметром порядка 7 мк. Исследуемый в обратном ходе лучей объектив 4 укреплен в объективодержателе. Изображение отверстия диафрагмы формируется исследуемым объективом через длиннофокусный коллиматор 5 с объективом  $f=1600$  мм на вращающейся радиальной мире 6, служащей модулятором.

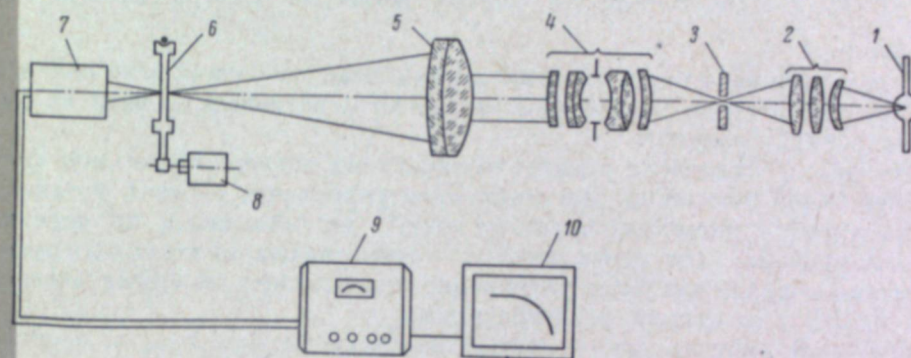


Рис. 1. Принципиальная схема фотоэлектрической установки НИКФИ.

Мира состоит из 36 или 72 пар черных и белых секторов. Она перемещается в направлении, перпендикулярном оптической оси системы, и одновременно вращается вокруг оси, параллельной оптической оси. Таким образом, световой пучок, формирующий изображение отверстия, модулируется системой секторов, последовательно перемещаясь от края до края.

Датчиком 7 электрического сигнала является фотоэлектронный умножитель ФЭУ-19М, на выходе которого появляются импульсы напряжения частотой 350—500 гц (частота определяется числом оборотов ведущего мотора и отношением диаметров шкива мотора 8 и обода оправы миры 6) и с максимальным размахом до 4 в. Импульсы напряжения подаются на вход избирательного усилителя 9, который выделяет первую гармоническую составляющую импульсов. Эта составляющая детектируется и после сглаживания пульсации записывается на пленку с помощью шлейфового осциллографа МПО-2 10. Форма выпрямленного сигнала во времени повторяет форму огибающей первой гармонической составляющей импульсов.

Частота модуляции светового потока постоянна, а пространственная частота меняется в зависимости от положения изображения отверстия относительно центра миры.

Форма импульсов напряжения отличается от прямоугольной и меняется во времени. Применение избирательного усилителя, настроенного на частоту следования импульсов, позволяет выделить первую гармонику этих импульсов. Этот результат, достигнутый электрическим путем, тождествен результату, получающемуся при применении миры с синусо-

соидальным распределением коэффициента пропускания (в функции центрального угла миры)

$$T = T_0(1 + \alpha \sin n\varphi).$$

Здесь  $T_0$  — средний коэффициент пропускания;  $\alpha$  — некоторый коэффициент;  $n$  — число пар секторов модулятора;  $\varphi$  — угол поворота миры. На пленке автоматически получается график зависимости коэффициента передачи контраста от положения изображения отверстия относительно центра миры; это расстояние однозначно связано с пространственной частотой  $N$ .

$$N = \frac{nv}{2\pi r},$$

где  $n$  — число пар секторов модулятора;  $v$  — увеличение системы, равное  $\frac{f_{\text{кол.}}}{f_{\text{об.}}}$ ;  $r$  — расстояние от центра миры до центра изображения отверстия.

С помощью некоторых дополнительных приспособлений этим способом удается измерить не только амплитуду, но и зависимость фазы от пространственной частоты.

На рис. 2 приведена электрическая схема экспериментальной фотоэлектрической установки. Дистанционное управление работой установки производится с помощью переключателей, установленных на передней панели прибора. Эти переключатели обеспечивают включение привода смещения и вращения миры, изменение направления смещения, включение МПО-2 для съемки регистрограммы.

ФЭУ-19М смонтирован в светонепроницаемом футляре, в переднюю стенку которого сделано отверстие с тубусом. Делитель напряжения для питания диодов ФЭУ собран на цоколе умножителя. Сигнал, снимаемый с нагрузки ФЭУ, поступает на вход катодного повторителя, выход которого нагружен полосовым фильтром. Катодный повторитель нужен для согласования нагрузки ФЭУ с низким входным сопротивлением фильтра (600 ом). На выходе фильтра выделяется первая гармоника и импульсы от ФЭУ, которая подается на парафазный каскад. Этот каскад питает выпрямитель, собранный по мостовой схеме на 4 диодах ДД. Нагрузкой выпрямителя служит сопротивление утечки сетки лампы входного каскада, шунтированное небольшой емкостью. На выходе схемы стоит мостовая схема, имеющая ряд преимуществ перед трансформаторным выходом.

Фотоумножитель питается от стабилизированного выпрямителя, собранного на одном шасси с избирательным усилителем.

### Результаты исследований объективов

Для проверки работы нашей установки были измерены частотные контрастные характеристики комплекта кинесъемочных объективов типа ОКС отечественного производства (завод «Ленкинап»), применяемых для съемки нормальных фильмов. Параметры объективов приведены в табл. 1.

Измерения проведены в центре поля при следующих относительных отверстиях: 1 : 2, 1 : 2.8, 1 : 4, 1 : 5.6, 1 : 8, 1 : 11, 1 : 16.

Полученные данные представлены на рис. 3—6, где по оси ординат отложены значения относительного контраста, а по оси абсцисс — пространственная частота в фокальной плоскости испытуемого объектива. На основе графиков в табл. 2 приведены значения контраста в изобра-



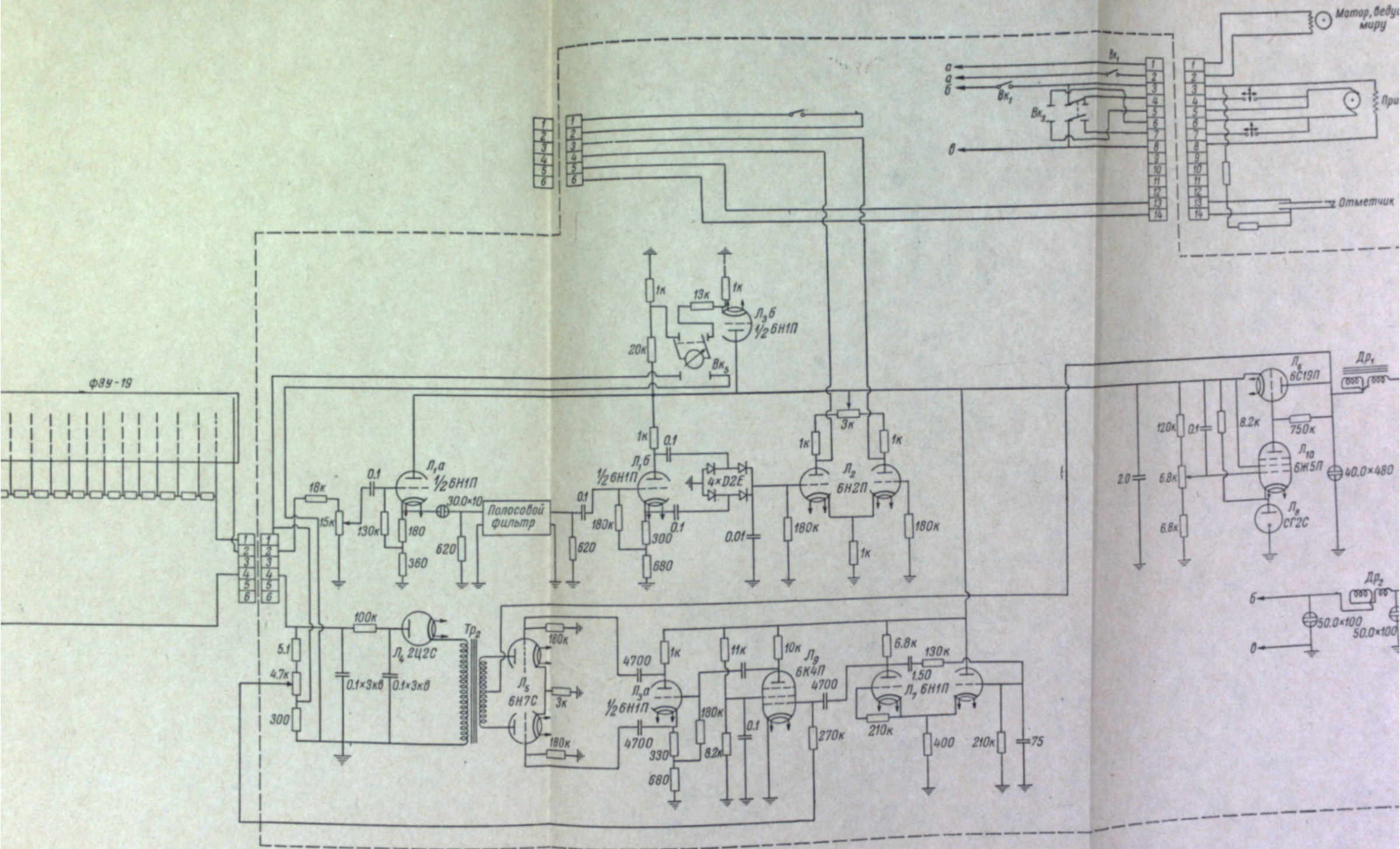


Рис. 2. Электрическая схема установки.

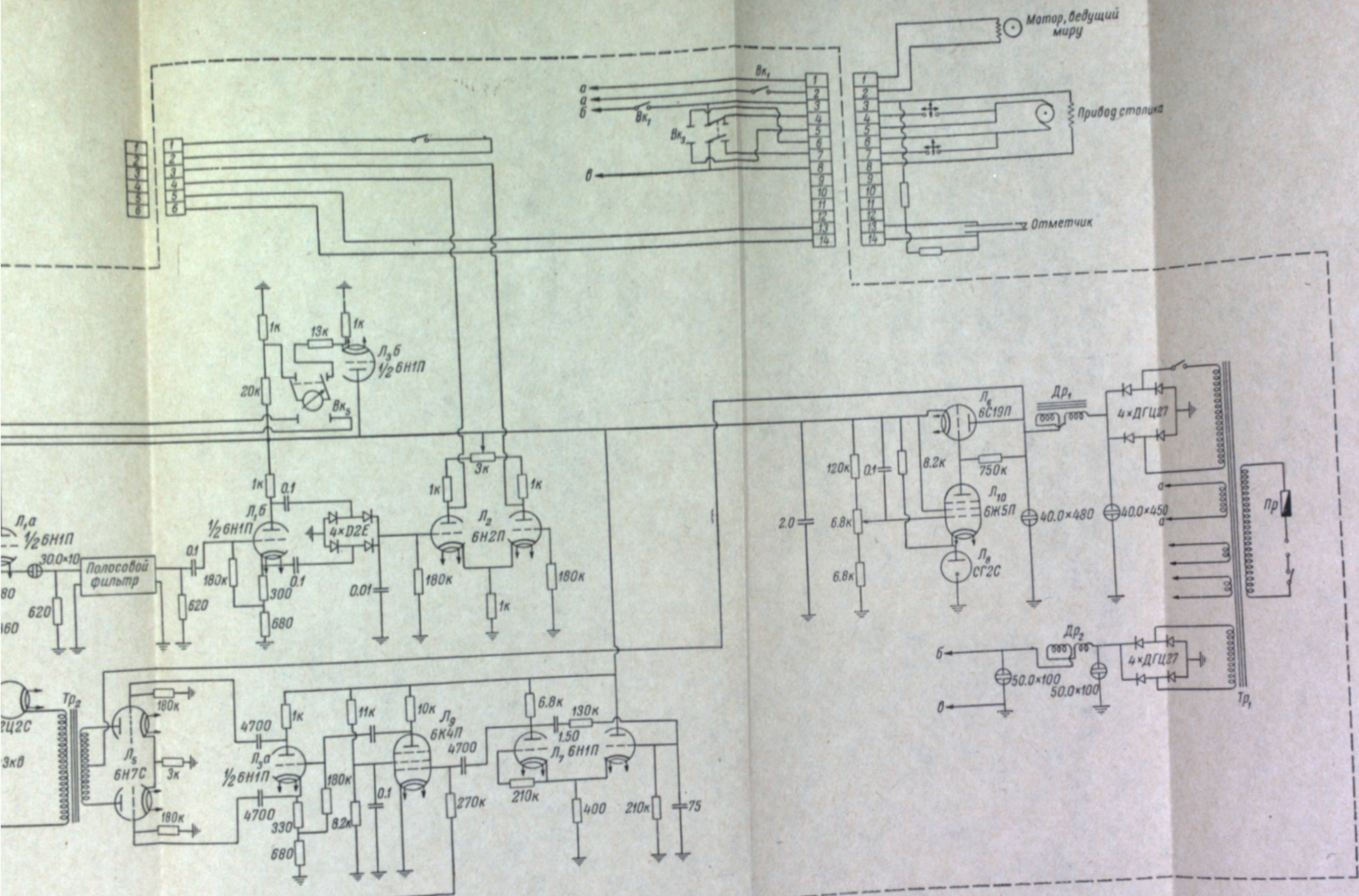


Рис. 2. Электрическая схема установки.

Таблица 1

Наименование объектива	Фокусное расстояние, мм	Геометрическое относительное отверстие 1:n	Эффективное относительное отверстие 1:n <sub>э</sub>	Угол поля зрения 2β
ОКС1-50-1 . . .	50	1:2	1:2.4	30°26'
РО60-4 . . . . .	75	1:2	1:2.4	20 30
ОКС1-80-1 . . .	80	1:2	1:2.4	19 18
РО18-1 . . . . .	100	1:2	1:2.4	15 30

нии в зависимости от частоты в центре поля при относительных отверстиях 1:2 и 1:5.6. При этом в числителе указан контраст при относительном отверстии 1:5.6, а в знаменателе — контраст при полном отверстии.

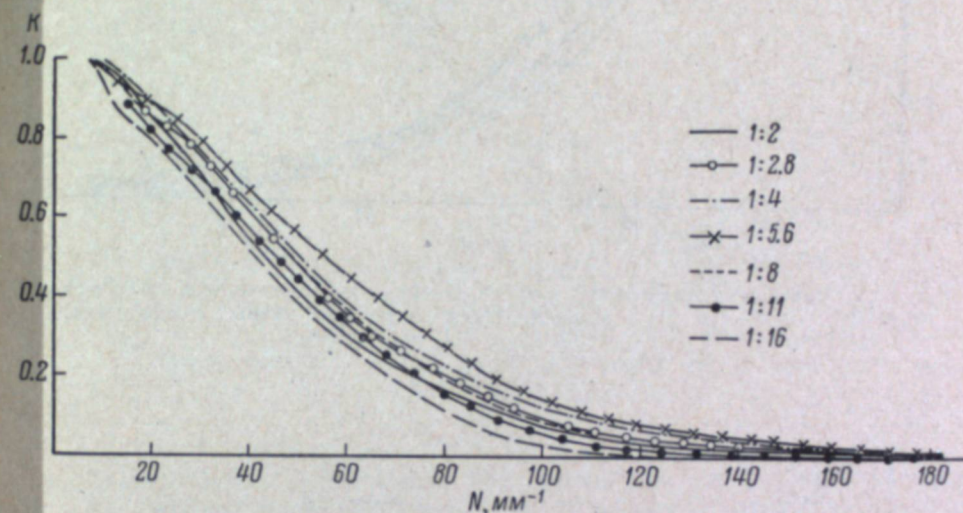


Рис. 3. Частотно-контрастная характеристика кинесъемочного объектива ОКС1-50-1,  $f = 50$  мм, 1:2 в центре поля кадра при разных диафрагмах.

Из приведенных характеристик можно сделать вывод, что по частотно-контрастной характеристике объектив ОКС1-50-1 лучше, чем другие объективы. Однако это, к сожалению, не характеризует объектив полностью, так как не измерялись частотно-контрастные характеристики объективов по полю.

Таблица 2

Наименование объектива	Частота, мм <sup>-1</sup>				
	10	30	50	60	70
ОКС1-50-1 . . . . .	0.98	0.80	0.56	0.46	0.36
	0.98	0.70	0.42	0.30	0.23
РО60-4 . . . . .	0.96	0.60	0.34	0.20	0.13
	0.94	0.53	0.28	0.17	0.11
ОКС1-80-1 . . . . .	0.94	0.62	0.25	0.15	0.10
	0.92	0.55	0.20	0.09	0.07
РО18-1 . . . . .	0.97	0.70	0.35	0.23	0.12
	0.94	0.53	0.20	0.10	0.04

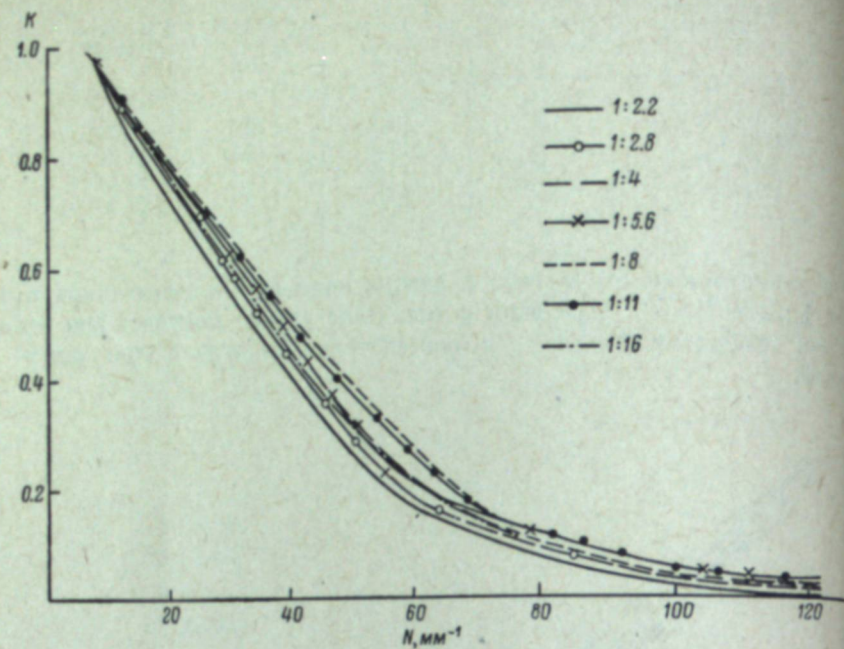


Рис. 4. Частотно-контрастная характеристика кинесъемочного объектива PO60-4,  $f = 75$  мм, 1:2 в центре поля кадра при разных диафрагмах.

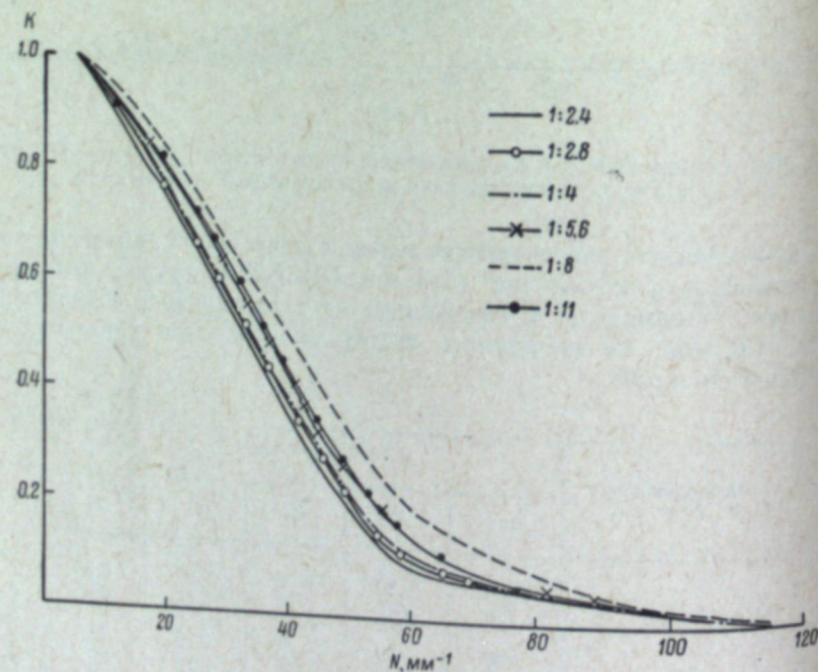


Рис. 5. Частотно-контрастная характеристика кинесъемочного объектива OKS1-80-1,  $f = 80$  мм, 1:2 в центре поля кадра при разных диафрагмах.

Частотно-контрастные характеристики могут быть пересчитаны в переходную характеристику (пограничная кривая), максимальная крутизна которой определяется интегралом от частотно-контрастной характеристики.

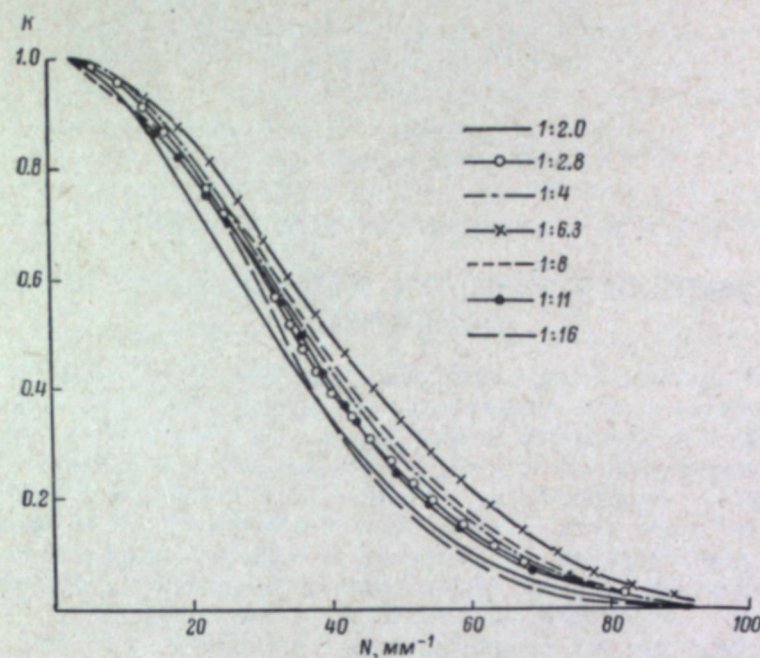


Рис. 6. Частотно-контрастная характеристика кинесъемочного объектива PO18-1,  $f = 100$  мм, 1:2 в центре поля кадра при разных диафрагмах.

#### Выводы

1. Разработана и изготовлена экспериментальная фотоэлектрическая установка, позволяющая исследовать распределение освещенности в оптическом изображении, создаваемом кинесъемочными объективами в центре поля при разных относительных отверстиях до 1:16.
2. Разработана методика измерения частотно-контрастной характеристики объективов и обработки результатов для составления графиков зависимости относительного контраста от пространственной частоты.
3. Для ряда кинесъемочных объективов исследована зависимость контраста в оптическом изображении радиальной миры от относительного отверстия для центра поля.

Авторы приносят благодарность Н. В. Хозовой и Л. М. Гловой за участие в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. Mertz, Gray, Bell Syst. Techn. J., 13, 464, 1934.
2. P. Duffieux. L'Integrale de Fourier et ses applications à l'optique. Rennes, 1947.
3. O. Schade, RCA Review, 9, 5, 245, 490, 653, 1948.
4. Ф. Перрен, Усп. физ. наук, 78, 307, 1962.
5. I. Rudolf, Bild u. Ton, 12, 328, 357, 1959.
6. А. Т. Ащеулов, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 6, 1 и вып. 7, 10, 1960.
7. О. А. Герасимова, Техника кино и телевид., 6, вып. 3, 22, 1962.
8. Н. П. Березин, Опт.-мех. промышл., 28, вып. 11, 29, 1961.
9. I. Schilling, H. Zöllner. Optik aller Wellenlängen. Berlin, Akademie-Verlag, 299, 1959.
10. Н. Kubota, T. Asakura, Applied Optics, 1, № 3, May, 1962.
11. P. Lindberg, Optica Acta, 1, 80, 1954.
12. E. Ingelstam, Phot. Korr., 95, 135, 1959.

И. Б. БЛЮМБЕРГ, Т. М. ЗЯЗИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В ряде предшествующих сообщений мы оценивали качество кинематографического изображения тоновоспроизведением, резкостью, снятием рирпроекцией, т. е. шением мелких деталей и зернистостью. Эти критерии не определяют качества полностью, так как оно в значительной мере зависит от других обстоятельств, определяющих эмоциональное воздействие изображения на зрителя. Иначе говоря, удовлетворительные значения перечисленных выше величин являются необходимым, но недостаточным условием получения высококачественного изображения. В дополнение к ним изображение должно оцениваться как визуально хорошее.

Мы ограничиваемся только четырьмя критериями качества, так принимаем, что задачей техники кинематографии является обеспечение возможности получения технически хорошего изображения, т. е. изображения, передающего такое количество полезной информации об объекте съемки, которое может быть воспринято зрителем. Мы не вникаем в то, как эти возможности будут использованы режиссером, оператором, дождником и т. д.

Для того чтобы можно было предъявить обоснованные требования к величинам перечисленных выше критериев качества в любом из промежуточных кинематографических изображений (оригинальный негатив, промежуточный позитив, контратип, экранный позитив), нужно знать, во-первых, необходимые значения этих критериев в изображении на экране и, во-вторых, закономерности, связывающие эти значения на экране со значениями в предшествующих изображениях.

По вопросу об определении необходимого качества тоновоспроизведения в кинематографии в литературе нет единой точки зрения. Наиболее часто встречаются указания, что тоновоспроизведение должно быть правильным или хотя бы пропорциональным. Первое означает, что детали яркости в изображении и интервал яркости равны соответствующим величинам в объекте. Второе заменяет равенство пропорциональностью.

Когда заходит речь о передаче тонов объектом изображением, обычно обращаются к правилу Гольдберга. Мы не могли непосредственно воспользоваться этим правилом, так как оно не учитывает неизбежные изменения деталей яркости при съемке, а также процесса проекции. Поэтому для установления зависимости тоновоспроизведения на экране и в предшествующих изображениях мы воспользовались уравнениями, приведенными в [1, 2, 3]:

$$\delta_a = \delta_o \beta_c g_n g_{a.p.} \beta_{пр.} Q,$$

$$\delta_a = \delta_o \beta_c g_n g_{п.п.} g_{кт.} g_{a.p.} \beta_{пр.} Q,$$

$$\delta_a = \delta_o \beta_c g_n g_{a.p.} \beta_{пр.} Q \beta_c g_n g_{a.p.} \beta_{пр.} Q, \quad (3)$$

$$\delta_a = \delta_o \beta_c g_n \beta_{пр.} Q g_{п.п.} g_{н.т.} g_{a.p.} \beta_{пр.} Q. \quad (4)$$

Здесь  $\delta_a$  — деталь яркости на экране, отвечающая детали в объекте  $\delta_o$ ;  $\beta_c$  и  $\beta_{пр.}$  — коэффициенты передачи контраста при съемке и проекции;  $g_n$ ,  $g_{п.п.}$ ,  $g_{кт.}$  и  $g_{a.p.}$  — градиенты соответственно негатива, промежуточного позитива, контратипа и экранного позитива;  $Q$  — отношение эффективной плотности почернения к диффузной.

Уравнение (1) характеризует простейший кинематографический процесс: съемка—негатив—позитив—проекция на экран. Уравнение (2) отвечает этому же процессу, но с печатью экранного позитива и контратипа. Уравнение (3) соответствует изображению фото-

Тоновоспроизведение мы оценивали построением яркостно-контрастных характеристик равно единиче, а пропорциональное тоновоспроизведение достигается при произведении множителей, равном постоянной величине. Крайняя маловероятность этого и другого вида даже при беглом взгляде на уравнения (1)–(4). Действительно, все множители при  $\delta_o$  являются функциями  $B_o$  и функциональные зависимости их весьма различны.

Мы получили большое количество экспериментальных кривых  $\frac{\delta_a}{\delta_o}, \lg B_o$ , но ни одна из них не отвечала правильному или пропорциональному тоновоспроизведению. Характерными являются кривые 4 и 5 (рис. 1). Уменьшение деталей в тенях изображения по сравнению с объектом обусловлено низкими значениями  $\beta_c$  и  $\beta_{пр.}$ , а уменьшение деталей в светах — малым значением  $g_{п.п.}$  вследствие использования начального участка характеристической кривой позитивной пленки. Некоторое возрастание деталей в полутонах обусловлено значением  $Q > 1$ , а также тем, что используемое производство  $\gamma_{п.п.}$  в кинематографии несколько больше 1.

Мы получили большое количество экспериментальных кривых  $\frac{\delta_a}{\delta_o}, \lg B_o$ , но ни одна из них не отвечала правильному или пропорциональному тоновоспроизведению. Характерными являются кривые 4 и 5 (рис. 1). Уменьшение деталей в тенях изображения по сравнению с объектом обусловлено низкими значениями  $\beta_c$  и  $\beta_{пр.}$ , а уменьшение деталей в светах — малым значением  $g_{п.п.}$  вследствие использования начального участка характеристической кривой позитивной пленки. Некоторое возрастание деталей в полутонах обусловлено значением  $Q > 1$ , а также тем, что используемое производство  $\gamma_{п.п.}$  в кинематографии несколько больше 1.

Мы получили большое количество экспериментальных кривых  $\frac{\delta_a}{\delta_o}, \lg B_o$ , но ни одна из них не отвечала правильному или пропорциональному тоновоспроизведению. Характерными являются кривые 4 и 5 (рис. 1). Уменьшение деталей в тенях изображения по сравнению с объектом обусловлено низкими значениями  $\beta_c$  и  $\beta_{пр.}$ , а уменьшение деталей в светах — малым значением  $g_{п.п.}$  вследствие использования начального участка характеристической кривой позитивной пленки. Некоторое возрастание деталей в полутонах обусловлено значением  $Q > 1$ , а также тем, что используемое производство  $\gamma_{п.п.}$  в кинематографии несколько больше 1.

Мы получили большое количество экспериментальных кривых  $\frac{\delta_a}{\delta_o}, \lg B_o$ , но ни одна из них не отвечала правильному или пропорциональному тоновоспроизведению. Характерными являются кривые 4 и 5 (рис. 1). Уменьшение деталей в тенях изображения по сравнению с объектом обусловлено низкими значениями  $\beta_c$  и  $\beta_{пр.}$ , а уменьшение деталей в светах — малым значением  $g_{п.п.}$  вследствие использования начального участка характеристической кривой позитивной пленки. Некоторое возрастание деталей в полутонах обусловлено значением  $Q > 1$ , а также тем, что используемое производство  $\gamma_{п.п.}$  в кинематографии несколько больше 1.

Мы нашли, что искажение тоновоспроизведения тем больше, чем больше интервал яркости объекта съемки. Кривые 4 и 5 (рис. 1) получены для объекта с интервалом, близким 1.3 (объект в ателье). Для объектов

\* Форма кривой  $\frac{\delta_a}{\delta_o}, \lg B_o$  зависит от интегральной яркости объекта съемки.

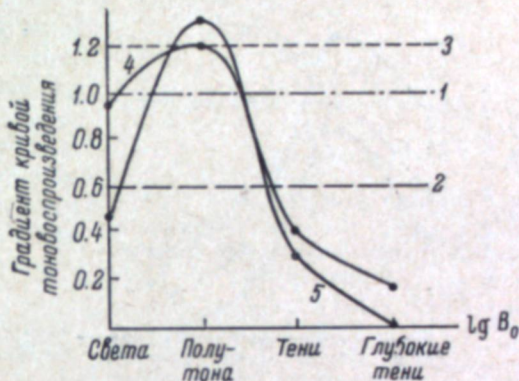


Рис. 1. Яркостно-контрастные характеристики изображений.

1 — правильное тоновоспроизведение (физически точная репродукция); 2 и 3 — пропорциональное тоновоспроизведение; 4 — тоновоспроизведение в простейшем случае в кинематографии; 5 — тоновоспроизведение в кинематографии с использованием рирпроекции.

с большим интервалом яркостей (натурные объекты) искажение тона произведения значительно больше.

В настоящее время мы не можем установить границу между допустимыми и недопустимыми искажениями тоновоспроизведения на экране. Мы знаем, что кривые 4 и 5 (рис. 1) отвечают изображениям на экране, признаваемым высококачественными. На рис. 2 приведены вычисленные из уравнения (4) кривые  $\frac{\delta_a}{\delta_o}$ ,  $\lg B_o$ , отвечающие изображениям на экране, полученному проекцией фильма на 16-мм пленку. Изображения, отвечающие на этом рисунке кривым 3 и 4, обычно признаются удовлетворительными, но худшими, чем изображение, отвечающее кривой 4 (рис. 1).

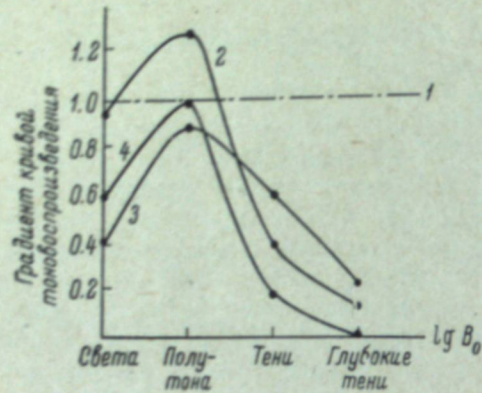


Рис. 2. Яркостно-контрастные характеристики изображений в узких кинофильмах.

1 — правильное тоновоспроизведение; 2 — съемка на 16-мм пленку и контактная печать позитивов; 3 — оптическая печать позитивов с 35-мм дубль-негативов; 4 — оптическая печать 16-мм дубль-негатива и контактная печать позитивов с него.

Из выражений (1)–(4) ясно, что неизменность будет достигнута в том случае, если значения всех сомножителей при  $\delta_o$  будут оставаться неизменными. Это обычно достигается путем использования съемочных и проекционных объективов с одинаковыми характеристиками  $\beta$ ,  $B_o$ , использования одних и тех же негативной и позитивной кинопленок или пленок с одинаковой формой характеристических кривых, обработки этих пленок до постоянных значений  $\gamma$ . Если же либо из сомножителей при  $\delta_o$  меняется, то приблизительная неизменность произведения сомножителей может быть выдержана путем ответственного изменения других величин. Так, например, использование более мелкозернистой позитивной пленки приведет к уменьшению значений  $Q$  и может быть компенсировано увеличением  $g_n, g_p$ . Использование объективов с меньшим рассеянием света приведет к увеличению значений  $\beta$  и также может быть компенсировано уменьшением  $g_n, g_p$ .

Передачу мелких по размерам деталей изображения мы оцениваем числом раздельно передаваемых штрихов  $R$ , используя обычную репериметрическую методику. Оценка производилась не менее чем пятью наблюдателями по 5–8 раз каждым. Изображение мира в результате печати переходило в последующие изображения. Техника выполнения экспериментов подробно описана в [4].

На рис. 3 и 4\* приведены характеристики изменения разрешения

\* Ломаные линии на рис. 3–8 не означают непрерывности функции, которая имеет реальное значение только для дискретных значений аргумента. Они использованы исключительно в интересах наглядности и компактности рисунков.

в последовательных изображениях, полученных контактной и оптической печатью [4]. Детальное исследование этой закономерности привело к выводам, что падение разрешения в последующем изображении по сравнению с предыдущими зависит от ряда факторов. Оно тем больше, чем выше абсолютное значение разрешения, чем ниже разрешающая способность позитивной пленки, чем хуже контакт между фотографическими слоями негатива и позитивной пленки и чем толще слой, несущий изображение [5].

Эти данные позволяют определить необходимые значения  $R$  в экранном позитиве, контратипе, промежуточном позитиве и негативе, если известно необходимое значение  $R$  на экране. Последнюю величину мы еще пока не определили. Как только будет найдено необходимое значение  $R$  в изображении на экране, можно будет определить необходимые значения  $R$  в предшествующих изображениях.

Значение резкости мы определяли по предельному масштабу увеличения изображения резкой границы [6], т. е. только в том случае, если в принципе так же, как и фактор зернистости  $G$  [8].

На рис. 5 и 6 даны значения резкости в последовательных изображениях.  $P$ , так же как и  $R$ , уменьшается в каждом последующем изображении, причем это обусловлено теми же факторами, что и уменьшение разрешения. Однако резкость падает медленнее разрешения.

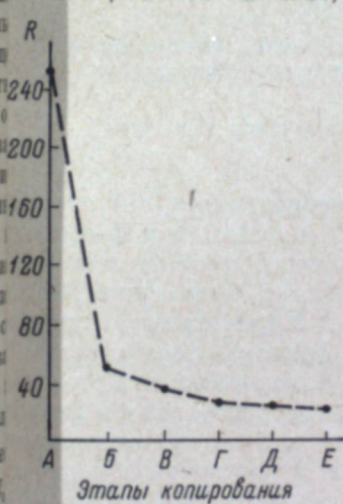


Рис. 4. Изменение разрешения при оптической печати в последовательных стадиях кинопроцесса.

Стапы копирования те же, что на рис. 3.

Эти данные позволяют найти необходимые значения  $P$  в кинонегативе, контратипе, экранном позитиве, если известно необходимое значение резкости на экране. Мы не знаем этого значения, но тщательно определили необходимое значение  $P$  в экранном позитиве, которое позволяет получить хорошую резкость на экране при удовлетворительных условиях проекции [7]. Оно равно 25; исходя из него мы определили необходимое значение резкости в предшествующих изображениях. Эти данные приведены в табл. 1.

Мы определяли статическую картину зернистости согласно [8], исходя из того, что динамическая зернистость приблизительно пропорциональна статической, что было показано Т. М. Левенберг [9].

Метод измерения зернистости не был вполне субъективным, так как наблюдатели оценивали картину зернистости при одинаковой яркости этой картины во всех случаях. В практических же условиях наблюдае-

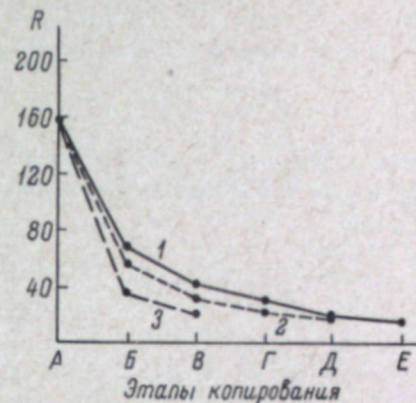


Рис. 3. Изменение разрешения при контактной печати в параллельном пучке в последовательных стадиях кинопроцесса.

1, 2, 3 — расстояние между слоями с печатаемым изображением и светочувствительным соответственно 0, 35 и 115 мк. А — негатив; Б — 1-й промежуточный позитив; В — 1-й контратип; Г — 2-й промежуточный позитив; Д — 2-й контратип; Е — экранный позитив.



Таблица 1

Ширина пленки	Необходимое значение $P$			
	в экранном позитиве	в контратипе	в промежуточном позитиве	в негативе
35-мм . . .	25	32	45	65
16-мм . . .	35	45	60	80

мая зернистость существенно зависит от яркости. Оценка производится не менее чем 5 наблюдателями по 10—15 раз.

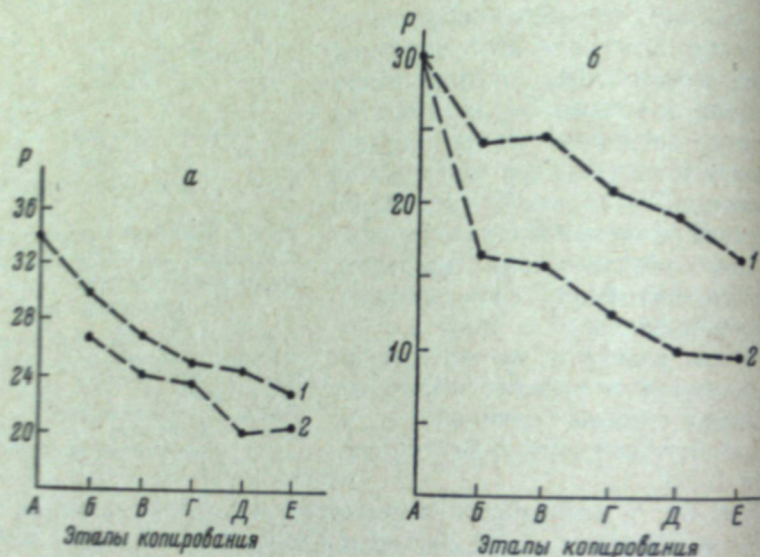


Рис. 5. Изменение резкости границы при контактной печати в параллельном (а) и диффузном (б) пучке в последовательных стадиях кинопроцесса.

Расстояние между слоями: 1 — отсутствует; 2 — 115 мк. Этапы копирования те же, что на рис. 3.

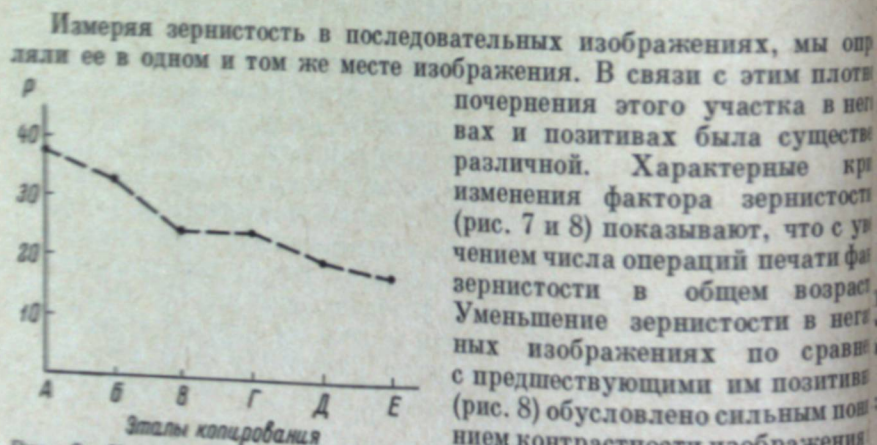


Рис. 6. Изменение резкости границы при оптической печати в последовательных стадиях кинопроцесса.

Этапы копирования те же, что на рис. 3.

Измеряя зернистость в последовательных изображениях, мы определяли ее в одном и том же месте изображения. В связи с этим плотность почернения этого участка в негативах и позитивах была существенно различной. Характерные изменения фактора зернистости (рис. 7 и 8) показывают, что с увеличением числа операций печати фактор зернистости в общем возрастает. Уменьшение зернистости в негативных изображениях по сравнению с предшествующими им позитивами (рис. 8) обусловлено сильным понижением контрастности изображения зернистой структуры ( $\gamma_n \approx 0.6$ ;  $\gamma_p \approx 1.5$ ). Обращает на себя внимание замедление роста зернистости в случае уменьшения контакта между фотографическими слоями. Согласно изложенному, это ухудшение контакта приводит к большому падению резкости и разрешения. Уменьшение резкости картины зернистой

гуры приводит к ухудшению ее различаемости. Этот эффект наблюдался во многих экспериментах.

Полученные данные позволяют определить предельно допустимое значение фактора зернистости в экранном позитиве, контратипе и негативе, если известно его предельно допустимое значение в изображениях на экране. Мы пока еще не определяли этого значения, но нашли то значение фактора зернистости в экранном позитиве, которое при нормальных условиях проекции позволяет получить изображение на экране, оцениваемое зрителем как удовлетворительное по зернистости [7]. Это значение близко к 12. Следует отметить, что такое и большее значение зернистости в позитиве получается при печати с оригинальных негативов, полученных на многих высокочувствительных кинопленках.

Из сказанного выше следует, что положение дела в кинематографии с разрешением мелких деталей изображения, с резкостью изображения и с зернистостью совершенно различно [10]. Так, например, получить в экранном позитиве на 35-мм чернобелой пленке  $R$ , близкое к нужному, и  $P$ , близкое к 25, нетрудно (табл. 2).

Однако получить  $G$  меньше 12 в экранном позитиве, напечатанном с негатива, 1-го или 2-го контратипов, не удалось. Удовлетворительное значение  $G$  может быть достигнуто только после значительного количества операций печати (включая и оптическую) в результате большого уменьшения значений  $R$  и  $P$ . Это позволяет в некоторых случаях умышленно

пожертвовать избытком  $R$  и  $P$  с тем, чтобы снизить различаемую  $G$ .

Предельно допустимые значения резкости и фактора зернистости в экранном позитиве мы определяли путем демонстрации позитивов с различными значениями  $P$  и  $G$ . Значения этих величин, которые оценивались наблюдателями как не мешающие восприятию изображения, считались допустимыми. Эти значения, естественно, зависят от угла, под которым рассматривалось изображение, и, следовательно, от расстояния между наблюдателями и экраном. Мы находили предельно допустимые значения для расстояния, равного 1.5—2 ширины экрана (2—4-й ряды). Такое расстояние отвечает расположению

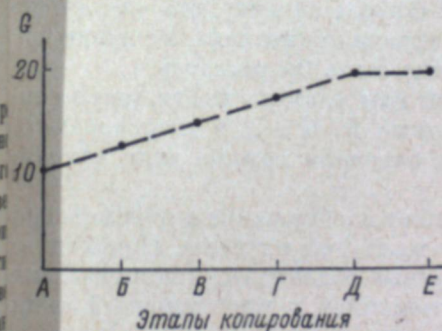


Рис. 8. Изменение зернистости почернения при оптической печати в последовательных стадиях кинопроцесса.

Этапы копирования те же, что на рис. 3.

первых рядов зрителей в коммерческих кинотеатрах с обычным экраном.

В других случаях это расстояние может быть существенно иным. Поэтому представляло интерес проверить, как будут меняться необходимые значения величин  $P$  и  $G$  с изменением расстояния между наблюдателем и экраном и, следовательно, с изменением угла зрения, под которым

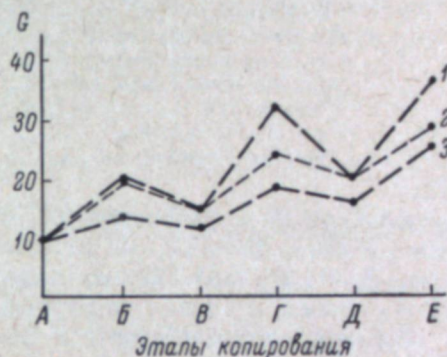


Рис. 7. Изменение зернистости почернения при контактной печати в параллельном пучке в последовательных стадиях кинопроцесса.

Расстояние между слоями: 1 — отсутствует; 2 — 35 мк; 3 — 115 мк. Этапы копирования те же, что на рис. 3.

Таблица 2

Изображения	$R$	$P$	$G$
Негатив . . . . .	50	104	12
Позитив контактной печати:			
с негатива . . . . .	42	60	16
с 1-го контратипа . . . . .	28	43	16
со 2-го контратипа . . . . .	21	38	20
Позитив оптической печати:			
с негатива . . . . .	33	43	14
с 1-го контратипа . . . . .	23	38	16
со 2-го контратипа . . . . .	19	30	16

рассматривалось изображение. Для этого мы демонстрировали образ тем же наблюдателям, расположенным на расстоянии 3—3.7 ширины рана (9—11-й ряды). Можно было ожидать, что для этого случая критическое значение  $P$  будет соответственно более низким, а  $G$  — более высоким.

Экспериментальные данные показывают, что при увеличении расстояния почти вдвое предельно допустимые значения  $P$  и  $G$  изменились приблизительно на 25%:

	Критические значения для 2—4-го рядов	Критические значения для 9—11-го рядов
$P$ . . . . .	20—22	16—18
$G$ . . . . .	12—13	16—18

Это наблюдение хорошо согласуется с данными [11], где было известно, что различие зернистой структуры изображения является лучшим при угловых размерах рассматриваемого участка, не больше. В противном случае различие зернистой структуры ухудшается.

Наши опыты позволяют предположить, что наблюдение [11] справедливо и для резкости. Действительно, в наших опытах угловые размеры поля зрения были больше  $2^\circ$ , что, вероятно, характерно и для большинства случаев демонстрации кинофильмов. Отсюда следует, что увеличение угловых размеров киноизображения на экране предъявляет меньшие требования к изменению  $P$ ,  $G$  и  $R$ , чем можно было бы ожидать.

Таким образом, к настоящему времени нам удалось найти только количественные зависимости между значениями  $P$ ,  $G$  и  $R$  в последовательных изображениях, а также критические значения первых двух величин в экранном позитиве.

Весьма важно знать, что именно ухудшает изображение в кинематографии. Свойства киноплёнок в этом смысле нами уже изучены. Необходимо исследовать также съёмочные и проекционные объективы, копировальные аппараты, лентопротяжные механизмы съёмочной и проекционной аппаратуры, учесть влияние качества перфорирования плёнок.

### Выводы

1. Качество кинематографического изображения может быть оценено по резкости, зернистости, тоновоспроизведением и разрешением малых величин деталей.
2. Тоновоспроизведение, оцениваемое яркостно-контрастной характеристикой, тем ближе к правильному, чем меньше интервал яркости объекта; в кинематографии оно никогда не бывает ни правильным, ни порциональным. Предложены уравнения тоновоспроизведения и условия, необходимые для получения киноизображений с удовлетворительным тоновоспроизведением.

3. Разрешение малых по величине деталей и резкость в каждом последовательном изображении ниже, чем в предыдущем. Исследована зависимость степени понижения разрешения  $R$  и резкости  $P$  от различных факторов и найдены нужные значения этих величин в экранном позитиве.

4. Значение фактора зернистости в последующем изображении может увеличиваться или уменьшаться по сравнению с его значением в предыдущем в зависимости от изменения резкости, разрешения, контрастности и яркости. Найдены предельно допустимые значения зернистости в экранном позитиве. ■

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Б. Блюмберг, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 1, 429, 1956.
2. И. Б. Блюмберг, Техника кино и телевид., 3, вып. 5, 41, 1959.
3. И. Б. Блюмберг. Технология обработки кинофотоматериалов. Изд. «Искусство», М., 1958.
4. И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина, Г. И. Терегулов, Техника кино и телевид., 4, вып. 7, 10, 1960.
5. И. И. Брейдо, Л. Круглякова, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 3, 359, 1958.
6. И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина, Г. И. Терегулов, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 268, 1962.
7. И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина, Т. А. Кийлер, Г. И. Терегулов, Техника кино и телевид., 5, вып. 8, 25, 1961.
8. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. фотогр., 1, 86, 1951.
9. Т. М. Левенберг. Исследование зернистости проявленных фотографических слоёв. Канд. дисс. Л., 1963.
10. И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина, Г. И. Терегулов, Техника кино и телевид., 5, вып. 11, 19, 1961.
11. L. A. Jones, G. C. Higgins, J. Opt. Soc. Amer., 41, 64, 1951.

Ю. К. ВИФАНСКИЙ, Ю. Н. ГОРОХОВСКИЙ

## ПОГРАНИЧНЫЕ КРИВЫЕ И РЕЗКОСТЬ ЧЕРНО-БЕЛОГО ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Методика и инструментальные средства получения  
пограничных кривых

Качество фотографического изображения с точки зрения его резкости (четкости) непосредственно связано с видом кривой пространственного распределения оптической плотности на краю изображения  $D=f(x)$ , называемой пограничной кривой [1, 2]. Настоящая работа посвящена рассмотрению особенностей этих кривых для черно-белого фотографического изображения и их связи с субъективным восприятием резкости.

Для точного определения кривой пространственного распределения оптической плотности на краю фотографического изображения на плоскости требуется, чтобы ширина фотометрируемого участка изображения была примерно на порядок меньше ширины зоны перехода от больших плотностей к малым. Как показало специальное исследование [3], ширина этой зоны для современных фотографических материалов в зависимости от условий экспонирования составляет 10—60 мк. В том случае ширина фотометрируемого участка изображения должна быть порядка 1—2 мк. При столь узких участках на картину распределения оптической плотности накладывается картина зернистости фотографического почернения, что вызывает флуктуации измеряемой величины оптической плотности. Оценка этих флуктуаций показала, что если задаться ошибкой в определении оптической плотности  $\pm 0.02$ , то для современных саморазвиваемых грубодисперсных материалов и, следовательно, грубозернистых изображений можно еще пользоваться размерами фотометрируемых участков порядка  $1 \times 700$  мк.

Столь малые размеры фотометрируемого поля — в 4—6 раз меньше минимальных, применяемых в обычных промышленно выпускаемых микрофотометрах МФ-2 и МФ-4, и необходимость измерять с большой точностью ( $\Delta D = \pm 0.02$ ) плотности до 2.5 требуют повышения чувствительности микрофотометров такого типа не менее чем на 1.5—2 порядка. Такое повышение было нами достигнуто заменой в регистрирующем микрофотометре МФ-4 селенового фотоэлемента фотоумножителем ФЭУ-14А с вакуумно-серебряно-цезиевым фотокатодом и модулирующим электродом. Фотоумножитель, величина которого пропорциональна коэффициенту пропускания измеряемого образца, подавался на вход специального логарифмического усилителя переменного тока [5]. Выходное напряжение усилителя  $U_{\text{вых}}$ , в принципе пропорциональное оптической плотности образца, измерялось гальванометром прибора и регистрировалось

фотографической пластинке. Ошибка в определении величины оптической плотности при использовании градуировочных графиков  $D=f(U_{\text{вых}})$  составляла [6]  $\pm 0.01 \div 0.02$ , а при использовании линейной аппроксимации ( $\Delta D = k \Delta U_{\text{вых}}$ ) в наихудших случаях  $\pm 0.08$ . Прибор позволяет измерять оптические плотности до 2.5 при следующих значениях площади сечения сканирующего пучка: около 200 мк<sup>2</sup> в белом и красном свете и около 1000 мк<sup>2</sup> в синем и зеленом свете [7].

Как уже указывалось, минимальная ширина зоны перехода в фотографическом изображении полуплоскости составляет около 10 мк. В то же время более или менее свободно оперировать кривыми записи распределения оптической плотности (регистрограммами) возможно при их размерах вдоль оси абсцисс не менее 20—30 мм. Поэтому в нашем микрофотометре было применено специальное устройство, которое позволяло растягивать ось абсцисс в 1000—2000 раз, т. е. позволяло проводить запись в масштабах 1000 : 1—2000 : 1 вместо 50 : 1—100 : 1 в обычном микрофотометре МФ-4. Ошибка в определении масштаба записи и его неравномерность при записи на разных частях фотопластинки не превосходила в среднем  $\pm 2.5\%$  при наибольших отклонениях  $\pm 4\%$ .

Для получения фотографических изображений края полуплоскости в качестве последней использовались либо стальная пластина толщиной 0.05 мм (контактная печать в параллельном пучке при плотном контакте и оптическая печать в проекционном резольвомере СР-13), либо элементы стандартной резольвометрической миры по ГОСТу 2819—45 (оптическая печать в резольвомере ФСР-5). Экспонирование проводилось в белом свете, а проявление — по обычной сенситометрической методике в стандартном проявителе № 1 по ГОСТу 2817—50.

Запись распределения оптической плотности на краю фотографического изображения проводилась в масштабе 1000 : 1 при скорости записи 25 мм в минуту. Скорость записи ограничивалась инерционностью прибора.

Особое внимание при измерениях было обращено на то, чтобы край фотографического изображения был параллелен оси щели микрофотометра. При допустимой ошибке в определении углов наклона прямолинейных частей пограничных кривых в  $\pm 5\%$  допустимая ошибка в установке параллельности составляла  $\pm 20'$ . Ошибка в определении крутизны прямолинейной части пограничной кривой  $\left(\frac{dD}{dx}\right)_{\text{max}}$  достигала  $\pm 7\%$ .

Полученные пограничные кривые численно характеризовались несколькими способами. В большей части нашего исследования определялись значения максимального пространственного градиента  $G = \left(\frac{dD}{dx}\right)_{\text{max}}$ , называвшегося в свое время Гольдбергом [1] фактором резкости.

В данной работе исследовалось влияние на величину максимального пространственного градиента следующих факторов: а) условий получения оптического изображения — апертуры объектива и характера его фокусировки, б) экспозиции и в) времени проявления.

### Зависимость максимального пространственного градиента от экспозиции и длительности проявления

Исследование влияния экспозиции и времени проявления проводилось для четырех черно-белых фотографических материалов: пленок Микрат-200 и Кинопозитив МЗ, аэропленки Панхром XI и импортной аэропленки типа Супер XX, Кодак.

Как видно из рис. 1, для всех исследованных случаев кривые зависимости максимального градиента от логарифма действующей экспозиции

проходят через максимум; таким образом, существует некоторая оптимальная экспозиция, при которой достигается наибольшая крутизна пограничной кривой. Величина этой оптимальной экспозиции больше оптимальной

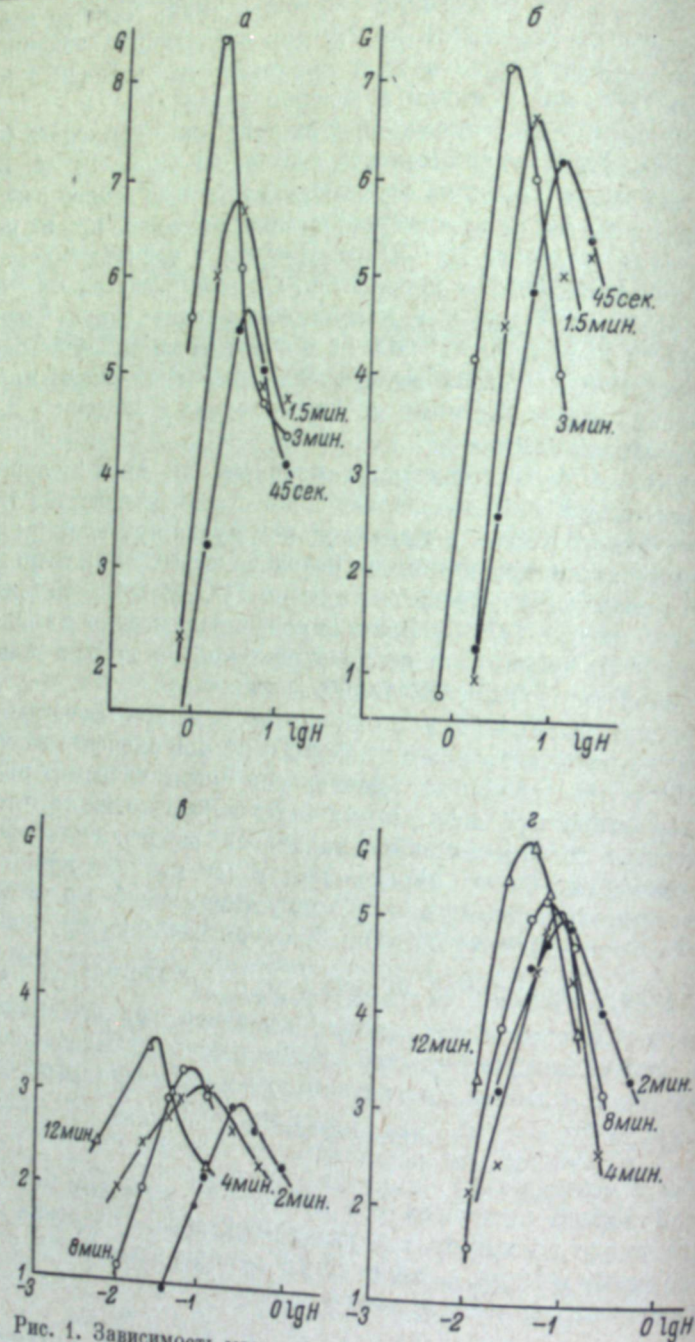


Рис. 1. Зависимость максимального градиента пограничных кривых  $G$  от экспозиции при разных временах проявления для четырех фотографических материалов: Микрат-200 (а), Кинозлатив МЗ (б), Панхром XI (в) и пленки типа Супер XX (г).

экспозиции для разрешаемой частоты одномерной решетки (рис. 2).  $\Delta \lg H$  составляет в логарифмических единицах от 0.15 до 0.7. В пределах каждого фотографического материала и для однотипных материалов величина этого различия не зависит от времени проявления. Различия оптимальных экспозиций и соответственно оптимальных плотностей св

зано с тем, что при экспонировании края полуплоскости свет рассеивается в неэкспонируемый участок слоя с одной стороны. При экспонировании же регулярной решетки в участок слоя, соответствующий штриху, приходит рассеянный свет из соседних штрихов с двух сторон.

Абсолютные значения максимального градиента при оптимальных экспозициях не находятся в прямом соответствии с величинами разрешаю-

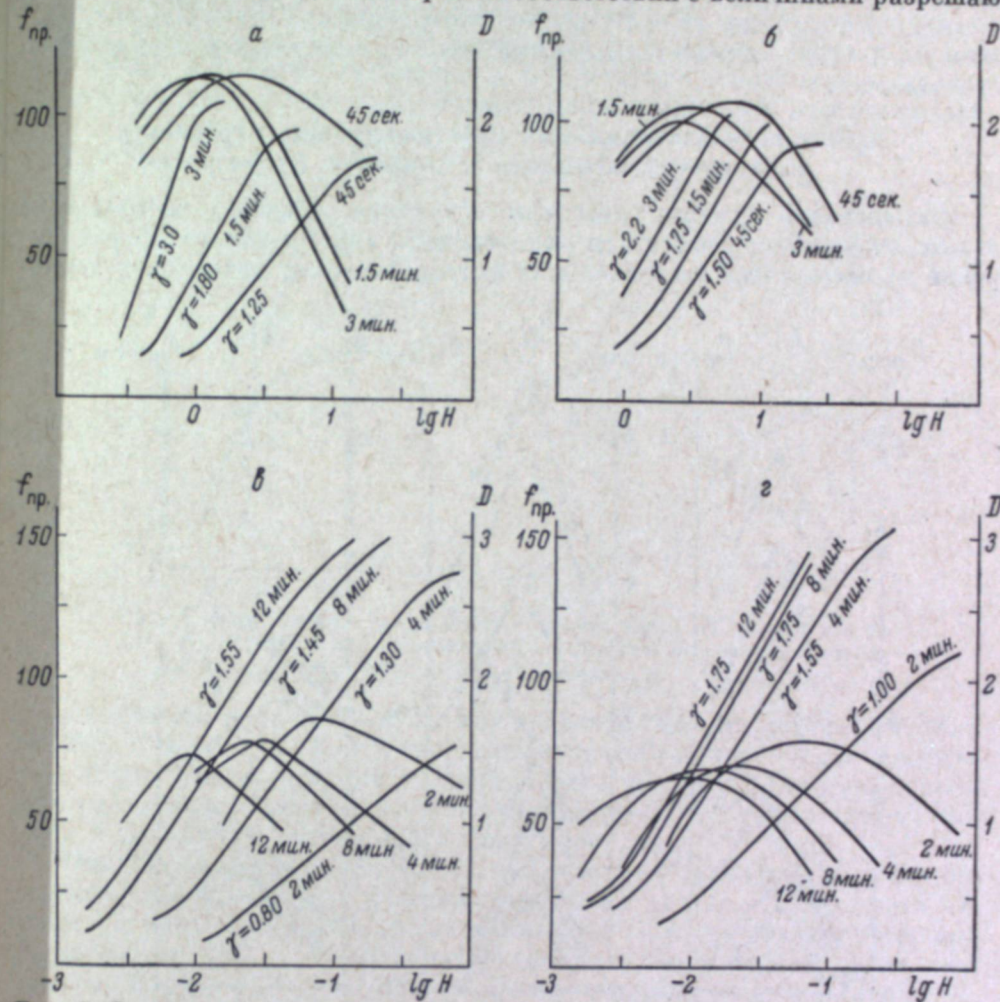


Рис. 2. Зависимость предельной разрешаемой частоты  $f_{пр}$  от экспозиции и характеристические кривые при разных временах проявления для тех же, что и на рис. 1, фотографических материалов.

щей способности. Прямое соответствия можно было бы ожидать лишь в том случае, если бы: а) формирование изображения в слое было обусловлено лишь рассеянием света и отсутствовало отражение света от подложки (ореолы отражения), играющее большую роль при фотографировании значительных по площади ярких деталей объекта [8], и б) отсутствовали микроэффекты проявления, сильно влияющие на распределение плотностей на краю изображения полуплоскости и почти не влияющие на воспроизведение предельных групп штрихов в штриховой мире.

Различие между максимальным пространственным градиентом и разрешающей способностью проявляется и в характере зависимости этих величин от времени проявления. Как известно, величина разрешающей способности по мере проявления довольно быстро растет, достигает максимума, а затем медленно уменьшается; максимальный же градиент со вре-

менем проявления, пока происходит увеличение коэффициента контрастности, только возрастает.

Сопоставление более 800 пограничных кривых с соответствующими характеристическими кривыми показало, что в большинстве случаев оптические плотности, образующие прямолинейные участки пограничных кривых, соответствуют прямолинейным участкам характеристических кривых. Отступления от этого имеют место лишь при очень больших экспозициях, когда начинает сильно сказываться влияние света, отраженного от подложки.

#### Зависимость максимального пространственного градиента от апертуры объектива и характера фокусировки

Исследование влияния апертуры объектива, дающего изображение полуплоскости или решетки на эмульсионном слое, и характера фокусировки производилось на нескольких фотографических материалах экспонированных в резольвометре СР-13 для случая оптимальной экспозиции и при заданном времени проявления.

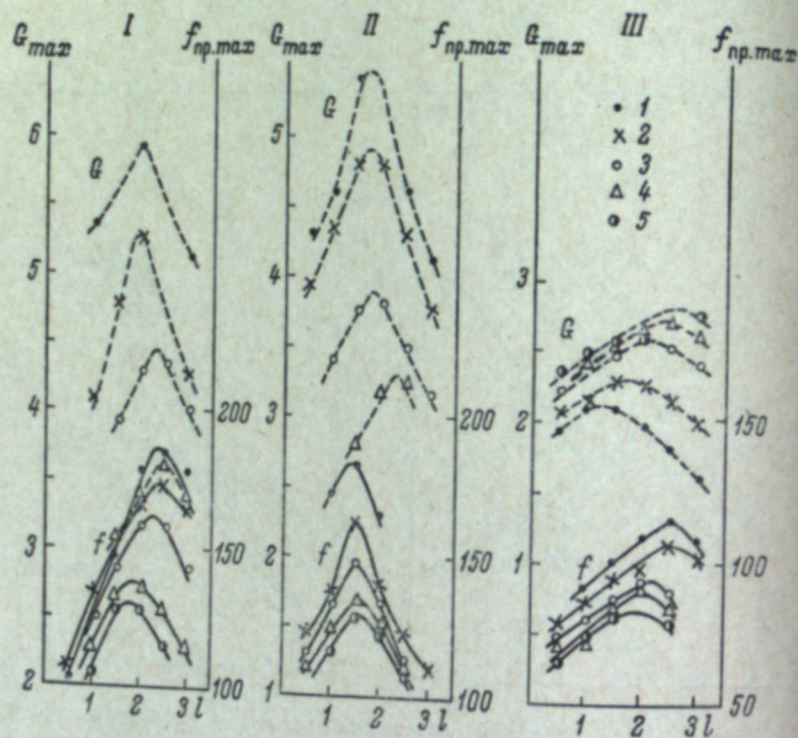


Рис. 3. Зависимость максимального градиента (прерывистые линии) и предельной разрешаемой частоты (сплошные линии) при оптимальных экспозициях от фокусировки объектива ( $\Delta l=1$  отвечает смещению на 0,5 мм) при разных апертурах  $A$  объектива резольвометра. I —  $A=0.3$ ; 2 —  $A=0.24$ ; 3 —  $A=0.15$ ; 4 —  $A=0.10$ ; 5 —  $A=0.075$ . I — Микрат-200; II — Кинопозитив МЗ; III — Панхром Х.

ированием их в резольвометре СР-13 для случая оптимальной экспозиции и при заданном времени проявления.

Как видно из рис. 3, положения оптимальных фокусировок (характеризуемые величиной  $l$ ) для полуплоскости и решетки несколько сдвинуты относительно друг друга. Это несовпадение естественно вытекает из известного факта [9] зависимости положения плоскости наилучшей фокусировки объектива по штриховой мере от частоты штрихов решетки. Характер зависимости оптимальных фокусировок объектива от его апертуры  $A$  различен для различных фотографических материалов, с которыми объектив

используется. Это свидетельствует о том, что различия в оптимальных фокусировках связаны не только со свойствами объектива, но и со свойствами используемого фотографического материала. В рассеивающих свет эмульсионных слоях максимальная объемная плотность рассеянного света, определяющая частичную концентрацию образующихся в результате проявления серебряных зерен, имеет место не у поверхности слоя, а (в зависимости от плотности упаковки эмульсионных кристаллов в слое) на той или иной глубине слоя [10]. В результате этого и происходит изменение положения плоскости оптимальной фокусировки относительно поверхности фотографического слоя. Именно такие различия в рассеянии света

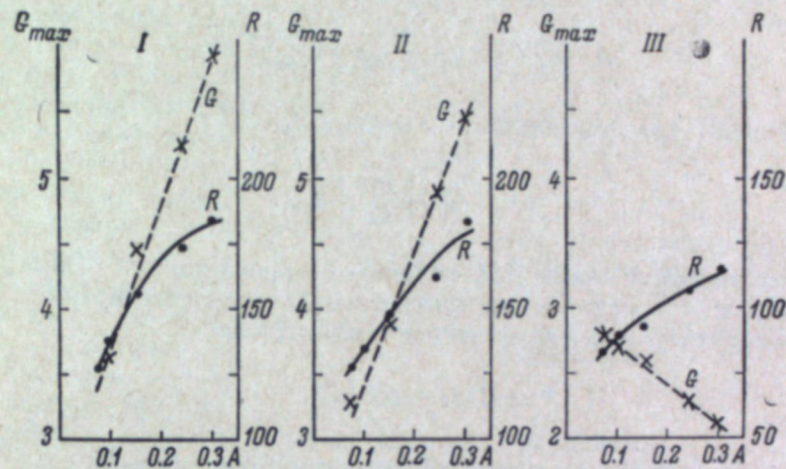


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности  $R$  и максимального градиента  $G$  при оптимальной экспозиции от апертуры объектива для тех же фотографических материалов, что и на рис. 3.

и имеют место в данном случае при сравнении высокодисперсных (Микрат-200, Кинопозитив МЗ) и грубодисперсных (Панхром Х) фотографических слоев. Кроме различий по дисперсности, указанные фотографические слои различаются оптической сенсibiliзацией, что также может привести к различным оптимальным фокусировкам.

Увеличение апертуры объектива, как известно, приводит к возрастанию разрешающей способности фотографического материала. Аналогичным образом для двух высокодисперсных материалов — несенсибилизированного (Кинопозитив МЗ) и сенсibiliзированного в относительно узкой зоне спектра (Микрат-200) — возрастает и величина фактора резкости (рис. 4). Для третьего, низкодисперсного и сенсibiliзированного в широкой зоне спектра материала (Панхром Х) происходит обратное явление: при возрастании апертуры фактор резкости уменьшается (рис. 4, III). Это обстоятельство связано с различиями указанных фотографических материалов по дисперсности и сенсibiliзации, а также и по их способности к образованию ореолов отражения.

#### Сопоставление численных оценок резкости по пограничным кривым с ее субъективным восприятием

В разное время было предложено несколько способов численной оценки пространственного распределения оптической плотности на краю фотографического изображения, которые могли бы служить количественной мерой зрительного восприятия резкости.

Одной из задач настоящей работы было непосредственно сопоставить некоторые способы оценки формы пограничных кривых как между собой,

так и с непосредственным субъективным восприятием резкости фотографического изображения.

При проведении такого сопоставления пограничные кривые характеризовались следующими величинами (рис. 5):

1) величиной градиента прямолинейной части пограничной кривой фактором резкости по Гольдбергу [1]

$$G = \left( \frac{dD}{dx} \right)_{\max}$$

2) величиной остроты по Джонсу и Хиггинсу [2] \*

$$A = \bar{G}^2 \Delta D = \frac{\Delta D}{x_B - x_A} \int_A^B \left( \frac{dD}{dx} \right)^2 dx,$$

3) оценкой, предложенной Мюллером [12],

$$\sigma = \frac{1}{\Delta D} \int_A^B \left( \frac{dD}{dx} \right)^2 dx,$$

4) предложенной нами [13] величиной произведения фактора резкости на разность оптических плотностей  $\Delta D$ , соответствующих началу и концу используемой части пограничной кривой,

$$P = G \Delta D = \Delta D \left( \frac{dD}{dx} \right)_{\max}$$

Второй и третий способы требуют вычисления интеграла  $\int_A^B \left( \frac{dD}{dx} \right)^2 dx$

где точки  $A$  и  $B$  на пограничной кривой отвечают значениям  $\frac{dD}{dx} = 0,005 \text{ мк}^{-1}$  [2]. Вычисление этого интеграла проводилось методом численного интегрирования, причем пограничная кривая разбивалась на участки, соответствующие изменению расстояния  $x$  на 2 мк. Ошибка в определении величин интегралов не превышала 10%.

Указанные численные оценки пограничных кривых сопоставлялись как между собой, так и с субъективными оценками четырех серий негативов, выражаемыми в баллах.

Первые две серии негативов состояли из 8 негативных изображений каждая, полученных при перспективной съемке городского пейзажа с вышки (переменная фокусировка объектива съемочной камеры) и при производстве географической карты (различная фокусировка объектива проекционной камеры).

Обе серии негативов были оценены 11 наблюдателями различной степени опытности как по самим негативам, так и по позитивным изображениям, полученным с них при оптимальных условиях контактной печати. Субъективная оценка в баллах по позитивным изображениям полностью совпала с оценкой по негативам.

Остальные две серии представляли собой ряды аэронегативов, полученных со средних высот фотографирования (масштаб 1 : 6000 и менее), которые содержали большое число разнообразных, как мелких, так и крупных элементов. Аэронегативы были оценены несколькими опытными дешифровщиками в балльной системе с точки зрения полноты даваемой информации об объекте фотографирования и с точки зрения их резкости.

\* Впоследствии Хиггинсом и Вольфе [11] было предложено другое определение остроты:  $A = \frac{\bar{G}^2}{\Delta D}$ .

Третья серия состояла из четырех аэронегативов одного и того же участка земной поверхности, полученных на пленке Панхром XI при разной фокусировке аэросъемочного объектива и охарактеризованных отличной, хорошей, посредственной и плохой оценками.

Наконец, четвертая серия состояла из трех аэронегативов на пленке Панхром X, имевших отличную, хорошую и посредственную оценки.

На аэронегативах, входивших в каждую серию, выбирали по 9—15 деталей (края и коньки крыш и другие объекты с резкими границами), расположенных в различных местах негатива. На вышеописанной микрофотометрической установке получали пограничные кривые, по которым для каждой детали объекта вычисляли указанные параметры; полученные значения в пределах каждого негатива усредняли.

В таблице приведены результаты сопоставления объективных численных характеристик резкости по пограничным кривым с субъективными балльными оценками раздельно для каждой из четырех серий опытов. В каждой серии численная оценка пограничной кривой наименее резкого негатива условно принималась за единицу. Негативы в таблице расположены в порядке убывания визуальной резкости.

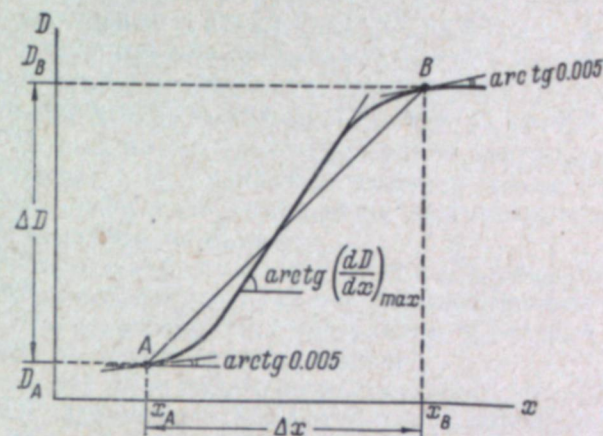


Рис. 5. Способы численной оценки формы пограничной кривой.

№ серии	Оценка	Номера негативов							
		1	2	3	4	5	6	7	8
I	A	19.5	6.8	3.4	2.8	3.7	2.1	1.05	1.00
	P	27	13.0	10.0	9.6	4.3	3.6	1.20	1.00
	G	7.8	4.2	3.6	3.1	2.8	2.5	1.05	1.00
	σ	3.2	1.95	1.65	1.50	1.55	1.45	1.05	1.00
II	A	16.5	13.5	10.5	7.0	6.4	2.9	0.95	1.00
	P	5.8	4.9	3.8	3.2	4.0	3.8	1.60	1.00
	G	3.6	2.9	2.5	2.3	2.2	1.40	1.30	1.00
III	A	3.4	3.2	2.9	2.5	2.4	1.30	1.30	1.00
	P	5.2	3.3	2.6	1.00				
	G	3.3	2.4	1.90	1.00				
IV	A	3.1	2.0	1.55	1.00				
	P	2.0	1.70	1.45	1.00				
	G	3.5	1.90	1.00					
V	A	2.8	1.60	1.00					
	P	2.3	1.40	1.00					
	G	1.70	1.25	1.00					

Как видно из таблицы, рассмотренные способы численной оценки в общем находятся в удовлетворительном соответствии с полуколичественной визуальной оценкой. Однако имеют место известные различия.

Оценка резкости величиной остроты в трех сериях опытов из которых является наиболее чувствительной, т. е. изменению субъективной оценки соответствуют наибольшие относительные изменения численных значений объективной оценки. В одном случае изменения численных значений объективной оценки. В другом случае наименьшие различия. Таким образом можно считать, что ни один из указанных способов численной оценки граничных кривых не имеет принципиальных преимуществ перед другими. Однако при практическом использовании предпочтительнее оценки, включающие

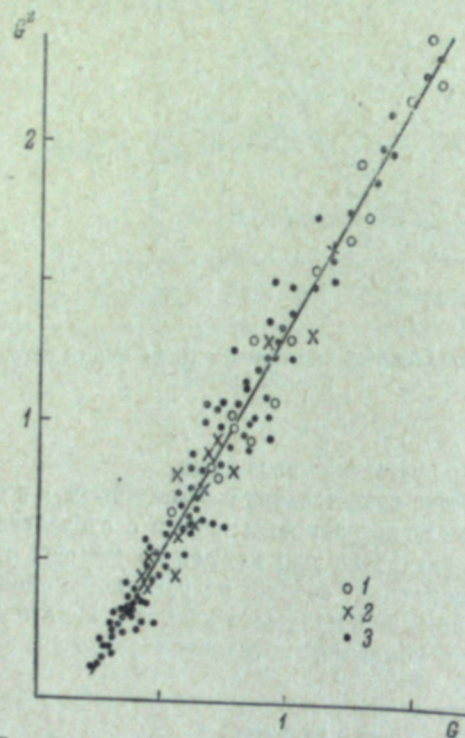


Рис. 6. Соотношение между величинами средних квадратичных  $\bar{G}^2$  и максимальных  $G$  градиентов пограничной кривой для ряда изображений, полученных на трех фотографических материалах (1 — Панхром XI, 2 — пленка типа Супер XX, 3 — Панхром X).

ках, показало, что между ними существует близкое к линейному соотношение в достаточно широких пределах изменения максимального градиента (от 0.2 до 1.6) и изменения интервала плотностей (от 0.6 до 2.8). По предложенной выше оценке резкости фотографического изображения  $= G\Delta D$  в пределах одного фотографического материала или группы типовых по области применения материалов с достаточной для практической точностью может считаться пропорциональной остроте изображения по Джонсу и Хиггинсу (в первом их варианте).

#### Выводы

1. Рассмотрены требования к условиям микрофотометрирования фотографического изображения полуплоскости и описаны приборный метод получения пограничных кривых, а также способы численной оценки формы последней.
2. Величина максимального пространственного градиента, характеризующего крутизну пограничной кривой, зависит от экспозиции, при

нее оценки, включающие крутизну максимального градиента пограничной кривой, так же как и нахождение последнего градиента относительно проще и связано с меньшими погрешностями, чем счисление среднего квадратичного градиента.

Субъективное впечатление о резкости изображения зависит не только от крутизны пограничной кривой, но и от контраста изображения, т. е. от плотности оптических плотностей соответствующих началу и концу пограничной кривой. Это обстоятельство учитывается в оценке, предложенной Дженсом и Хиггинсом [2]. Оно учитывается и нами: мы предлагаем [13] оценивать резкость изображения произведением максимального градиента на интервал оптических плотностей.

Представленное на рис. 6 поставление средних квадратичных градиентов  $\bar{G}^2$  с максимальными градиентами  $G$  для граничных кривых изображений реальных объектов, полученных на трех разнотипных аэри-

при некотором ее значении через максимум. При этом величина такой оптимальной экспозиции оказывается в 1.5—5 раз большей, чем оптимальная экспозиция для разрешающей способности. С ростом времени проявления максимальный градиент систематически возрастает; в этом отношении резкость существенно отличается от разрешающей способности.

3. Величина максимального градиента зависит, естественно, от характера фокусировки объектива при получении фотографического изображения. Оптимальное положение фотографического материала относительно объектива при фотографировании макроизображения (полуплоскости) отличается от оптимального положения при фотографировании одномерной решетки (разрешающая способность). При изменении апертуры объектива положения плоскостей оптимальной фокусировки для того и другого типа объектов фотографирования меняются по-разному.

4. Увеличение апертуры объектива во всех случаях приводит к возрастанию разрешающей способности, в то время как максимальный градиент возрастает только у высокодисперсных материалов; у низкодисперсных материалов с ростом апертуры градиент падает.

5. Поскольку закономерности, присущие фотографическому воспроизведению предельно мелких одномерных (разрешающая способность) и двухмерных (выделяющая способность) элементов оптического изображения очень близки друг к другу [14, 15], из вышеприведенных данных следует, что закономерности воспроизведения предельно мелких и относительно крупных двухмерных элементов оптического изображения существенно различны.

6. Экспериментально показано, что субъективное впечатление о резкости монохромного фотографического макроизображения можно численно характеризовать через пограничную кривую разными сравнительно равнозначными способами. По нашему мнению, наиболее удобной однозначной оценкой является произведение максимального пространственного градиента на интервал плотностей изображения (разность плотностей в конце и начале пограничной кривой).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. Goldberg, Phot. Journ., 36, 300, 1912.
2. G. C. Higgins, L. A. Jones, JSMPT, 56, 277, 1951.
3. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 290, 1962.
4. МН. 07839. Фотоэлектронные усилители ФЭУ-14А и ФЭУ-14Б. Проспект Новосибирского СХХ, 1960.
5. А. Н. Сус, В. М. Диденко, Радиотехника, 10, № 3, 78, 1955.
6. Ю. К. Вифанский, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 12, 29, 1960.
7. Ю. Н. Гороховский, Г. Л. Пекарская, Усп. научн. fotogr., VIII, 248, 1962.
8. Г. А. Истомин, Техника кино и телевид., 5, вып. 2, 1, 1961.
9. F. W. Rosberry, J. Res. Nat. Bur. Standards, 57, 17, 1956.
10. П. Х. Прусс, В. Н. Максина, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 4, 259, 1959.
11. G. C. Higgins, R. N. Wolfe, JSMPT, 65, 26, 1956.
12. R. Müller, Phot. Körr., 93, 131, 1957.
13. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 382, 1961.
14. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 4, 276, 1959.
15. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, М. Д. Хрулькова, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 5, 15, 1960.

Разрешающая способность исследованных многослойных и однослойных пленок (при  $A = 0.2$ )

Слой	$R, \text{мм}^{-1}$		
	многослойные пленки		однослойные поливы для образца А
	образец А	образец Б	
Синечувствительный . . . . .	60	60	105
Зеленочувствительный . . . . .	36	40	170
Красночувствительный . . . . .	23	21	115
Все три слоя вместе . . . . .	44	44	—

Ю. Н. ГОРОХОВСКИЙ, Г. И. ЛОЗНЕВОЙ

## ПОГРАНИЧНЫЕ КРИВЫЕ И РЕЗКОСТЬ ЦВЕТНОГО ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

## Метод пограничных кривых цветных изображений

Особенности строения многослойных цветофотографических материалов и связанные с ними особенности распространения света в эмульсионных слоях [1] делают объективную характеристику резкости (четкости) цветного фотографического изображения таким же трехмерно оценочным понятием, как и понятия светочувствительности, контрастности, разрешающей способности многослойного материала и фотографического эффекта на цветном поле. Физически резкость должна в этом случае характеризоваться триадой пограничных кривых, в принципе аналогичных пограничной кривой черно-белого серебряного изображения  $D=f(x)$  [2, 3].

Для получения пограничных кривых цветного изображения, вычерченных в координатах «поверхностная концентрация красителя в элементарном слое—расстояние в направлении, перпендикулярном краю изображения»,  $c'_x=f(x)$  изображение должно быть промикрофотометрировано так же, как описано в предыдущей статье [3].

Мы пользовались высокочувствительным микрофотометром, созданным на базе МФ-4 и записывающим пространственное распределение оптической плотности в отдельных узких зонах спектра (синей, зеленой и красной), отвечающих зонам максимального поглощения красителя цветофотографического материала. На рис. 1 приведены кривые спектрального распределения чувствительности приемника микрофотометра (электронный умножитель ФЭУ-14А) и кривые поглощения зональных светофильтров [5].

Один и тот же участок края цветного изображения полуосью микрофотометрировался трижды. По регистрограммам получали три пограничные кривые многоцветного изображения в координатах «зональная плотность—расстояние»:  $D_{\text{син.}}=f_1(x)$ ,  $D_{\text{зел.}}=f_2(x)$  и  $D_{\text{крас.}}=f_3(x)$ . Пользуясь обычной системой трех линейных уравнений, связывающих приведенные к серому поверхности концентрации красителей  $c'$  (единицы ФЭСП) в элементарных слоях с зональными плотностями [6, §§ 18, 19], мы получали триаду окончательных «аналитических» пограничных кривых элементарных слоев изображений:  $c'_{\text{ж.}}=\varphi_1(x)$ ,  $c'_{\text{п.}}=\varphi_2(x)$  и  $c'_{\text{г.}}=\varphi_3(x)$ . В случае многослойных поливов, на которых получались однокрасочные изображения, первичные и окончательные пограничные кривые были подобны друг другу ( $D_{\text{зон.}}=kc'$ ).

Объектами исследования были изображения края полуплоскости на негативной цветной пленке ДС-2 (образец А), а также на ее однослойных поливах, предоставленных нам Шосткинским химическим заводом. Значения разрешающей способности этих пленок [1] при апертуре объектива резольвометра  $A=0.2$  приведены в табл. 1.

Исследуемые цветные фотографические изображения получали путем контактной печати края стальной пластинки в параллельном пучке при надежном прижиме. Печать на многослойной пленке производилась как белым, так и выделяющим отдельные элементарные изображения светом, а печать на однослойных поливах—только белым светом.

Для того чтобы истинные пограничные кривые не были искажены приборными эффектами, ширина сканирующего пятна, имеющего прямоугольное сечение, должна быть малой сравнительно с шириной зоны размытости края изображения. Ранее было установлено [3], что при фотометрировании изображений на средних по качеству черно-белых материалах ширина пятна не должна быть больше 1—2 мк. Следовало выяснить, какой она должна быть при фотометрировании цветных изображений.

С этой целью одни и те же, средние по плотности, изображения края полуплоскости (серо-пурпурное, желтое, пурпурное и голубое) последовательно фотометрировались за синим, зеленым и красным светофильтрами при разной ширине входной щели микрофотометра и, следовательно, разной ширине сканирующего пятна (9, 6 и 3 мк).

Опыт показал, что по мере уменьшения ширины пятна в плоскости изображения крутизна пограничных кривых для красочных изображений возрастает, достигая максимума при 3—4 мк. Поэтому все по-

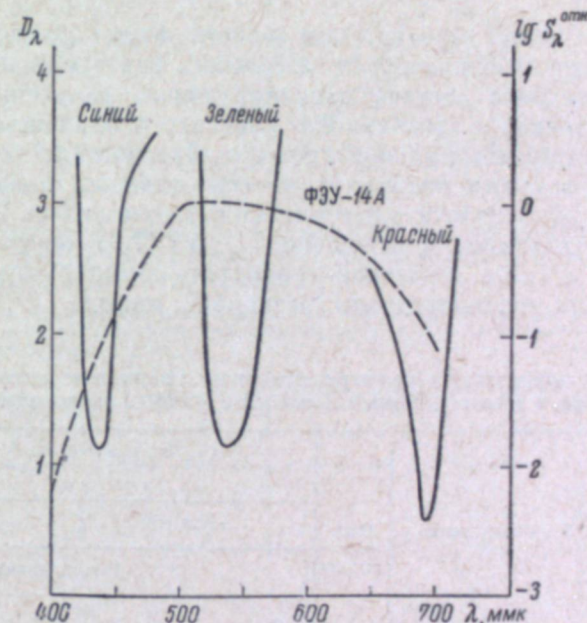


Рис. 1. Спектральное распределение чувствительности ФЭУ-14А и спектральные кривые поглощения зональных фильтров микрофотометра.



следующие измерения производились при ширине 4 мк; длина сканирующего пятна была всегда 300 мк. Максимальные поддающиеся измерения значения зональной плотности составляли 1.5—2.0.

При обработке регистрограмм, полученных на микрофотомере, с помощью градуировочных кривых учитывали погрешности в определении оптической плотности, вносимые логарифмическим усилителем прибора не строго линейно преобразующим поступающие от фотоумножителя сигналы в логарифмические выходные сигналы [3, 4].

Численной мерой физической резкости красочного изображения считали крутизна прямолинейного участка пограничной кривой  $(\frac{dc'}{dx})_{max}$ , которую мы по аналогии с черно-белыми изображениями условимся называть максимальным пространственным частотным коэффициентом.

### Зависимость формы пограничных кривых от условий экспонирования и проявления

Было изучено, как зависит форма пограничной кривой одноцветного изображения от следующих факторов: экспозиции при печати, спектрального состава экспонирующего излучения (в случае многослойной пленки) и длительности цветного проявления. Пограничные кривые соответствующих элементарных изображений на многослойной пленке и на однослойных поливах были сопоставлены между собой.

Результаты опытов представлены на рис. 2—4 и в табл. 2. Экспозиции находились в отношении 1 : 5 : 17, времена проявления составляли 3, 6 и 9 мин. в цветном проявителе обычного для негативных пленок состава при перемешивании резиновой кистью.

Максимальные пространственные градиенты элементарных красочных изображений в многослойной пленке при разных экспозициях и длительностях проявления

Экспонирующий свет	Отн. экспозиция	$(\frac{dc'}{dx})_{max}$ (мм <sup>-1</sup> ) для изображений								
		желтого			пурпурного			голубого		
		Время проявления $t_{пр.}$ мин.								
		3	6	9	3	6	9	3	6	
Белый . . . . .	$H_1$	3.6	6.0	7.6	0	0	4	0	0	
	$H_2$	12	15	18	10	15	25	5.0	7.0	
	$H_3$	21	26	31	19	28	42	8.0	9.0	
Выделяющий	$H_1$	4.0	10	12	4.0	6.0	10	4.0	4.8	
	$H_2$	15	18	27	14	16	26	10	12	
	$H_3$	22	30	48	21	29	46	18	22	
Прирост, % . . .	$H_1$	10	65	55	—	—	150	—	—	
	$H_2$	25	20	50	40	5	5	100	70	
	$H_3$	5	15	55	10	5	10	125	140	

Мы видим, что в исследованном достаточно широком диапазоне экспозиций максимальный пространственный градиент красочных изображений систематически возрастает с экспозицией. Это согласуется с тем, что наблюдается в случае серебряных черно-белых изображений. Надо отметить, что при еще больших экспозициях градиент красочного изображения подобно черно-белому [2, 3], достигает максимума и далее уменьшается.

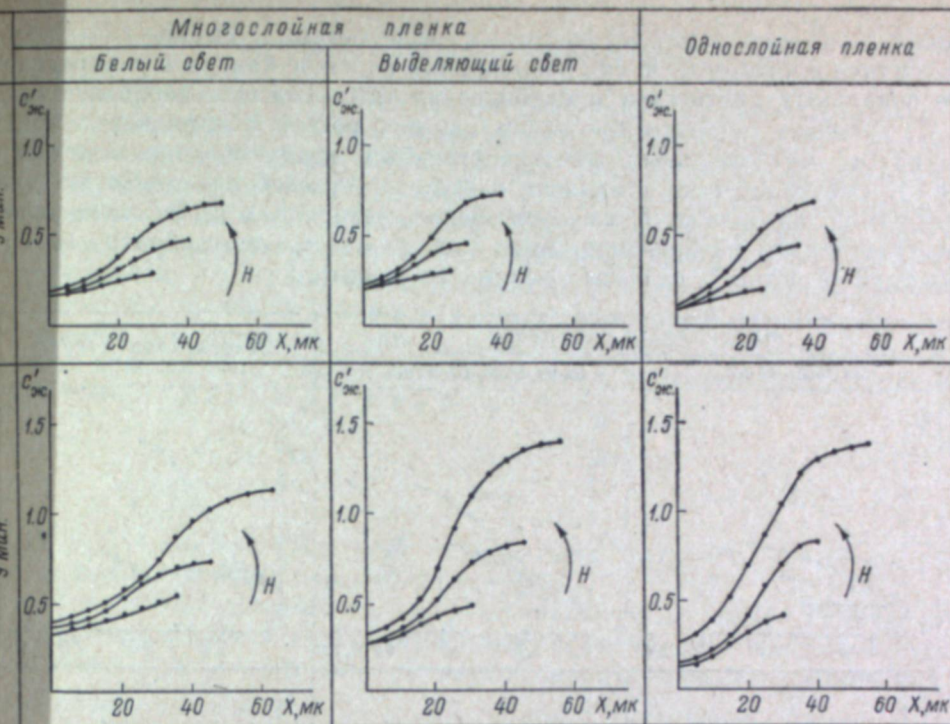


Рис. 2. Пограничные кривые желтых изображений на многослойной и однослойной пленках при разных экспозициях, спектральных составах экспонирующего излучения и временах цветного проявления.

Кривые на каждом графике расположены относительно оси абсцисс сравнительно произвольно: нулевое значение абсциссы отвечает участкам изображения, где концентрация красителя достигает примерно минимального значения.

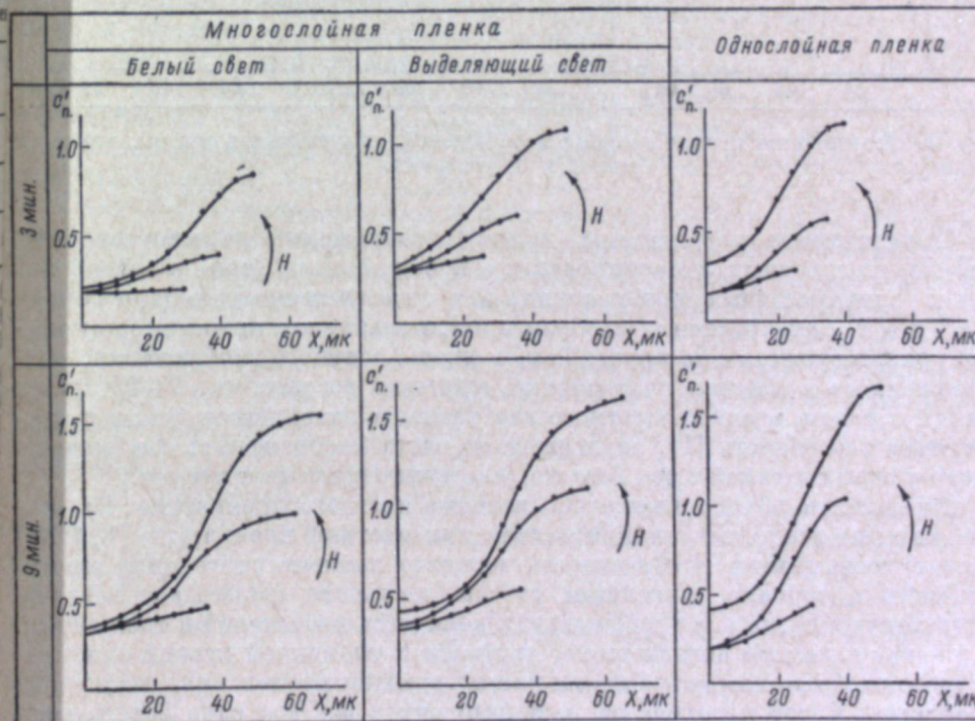


Рис. 3. Пограничные кривые пурпурных изображений, полученных в тех же, что и на рис. 2, условиях.

Однако мы были ограничены жесткими требованиями к ширине сканируемого пучка и потому не имели возможности надежно измерять распределение зональных плотностей в наиболее плотных цветных изображениях. Со временем цветного проявления, т. е. с ростом коэффициента контрастности, максимальный пространственный градиент систематически растет. Это опять-таки совпадает с соответствующей зависимостью серебряных изображений на черно-белых материалах [2, 3] и отклонение фотографического изображения края полуплоскости от изображения номерной решетки в области высоких ее частот.

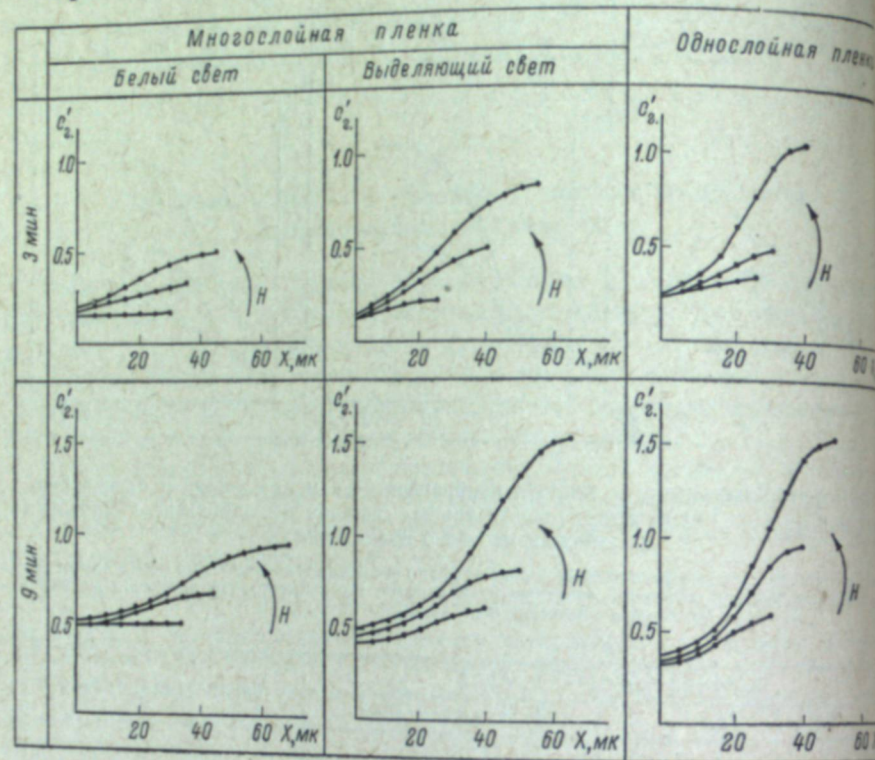


Рис. 4. Пограничные кривые голубых изображений, полученных в тех же, что и в рис. 2 и 3, условиях.

Сопоставление пограничных кривых изображений на многослойной пленке, полученных экспонированием в белом свете (три совмещенных одноцветных изображения) и в выделяющем свете (три отдельных одноцветных изображения), показывает, что во втором случае кривые существенно круче. Так, в случае голубого изображения, расположенного в нижнем слое пленки, крутизна возрастает в 2—2½ раза. Таким образом, резкость цветного изображения оказывается, как и раньше, способностью [1], зависящей от цвета изображения: она меньше всего у серых деталей и тем больше, чем насыщеннее цвет детали.

Это явление обусловлено особенностями цветного проявления. Известно явление взаимного влияния слоев при цветном проявлении [6, § 2], которое делает коэффициент контрастности каждого элементарного слоя многослойного материала зависящим от спектрального состава экспонированного излучения, т. е. от соотношения количеств красителей в трех слоях. Поскольку, как мы видели выше, крутизна пограничной кривой одноцветного изображения возрастает с ростом времени проявления, она должна возрастать и при переходе от экспонирующего все три слоя белого света к выделяющему данный элементарный слой излучению.

## Читаемость текста и пограничные кривые

Мы провели в небольшом объеме сопоставление так называемой читаемости [7] цветных репродукций печатного текста с крутизной соответствующих пограничных кривых. Читаемость текста представляет собой удобную меру субъективного восприятия резкости (четкости) фотографического изображения. Ею может служить величина, обратная минимальному размеру букв в фотографическом изображении, при котором незнакомый, не вызывающий ассоциаций и трудно запоминаемый текст может быть прочитан с более или менее нормальной скоростью при необходимых для нормальной работы зрения масштабе увеличения изображения и яркости поля адаптации. Мы, например, характеризовали читаемость величиной фактора читаемости

$$\frac{1}{h_{\min}}$$

где  $h_{\min}$  — высота букв (мм) в предельно читаемом, в соответствии с вышеприведенным определением, тексте.

В качестве текстового теста служил диапозитив испытательной таблицы, применяемой в опытах по физиологической оптике и состоящей из 9 групп отрывков печатного текста с буквами разного размера. Средний модуль изменения высоты букв от одной группы к следующей  $\frac{h_i}{h_{i+1}} = 1.25$ , наибольшая высота букв была 1,40 мм, наименьшая 0,22 мм. Диапозитив был изготовлен на сухом коллоиде, размером  $30 \times 30$  мм и имел абсолютный контраст.

Диапозитив помещали на место мира в проекционном резольвометре с объективом ЧМ (апертура 0,1), однотипном с резольвометром по ГОСТу 2819—45 [8], но дающим лишь в 5 раз уменьшенное изображение объекта. Содержащийся на диапозитиве текст впечатывали при разных экспозициях в испытуемую многослойную пленку, в качестве которой служил иной, нежели в предыдущих опытах, образец пленки ДС-2 (образец Б в табл. 1); печать производилась как белым, так и выделяющим светом. Одновременно с текстом впечатывалось изображение полуплоскости, создававшееся тонкой стальной пластинкой, которая помещалась рядом с диапозитивом.

Полученные таким образом 4 ряда негативных изображений независимо рассматривались пятью наблюдателями с помощью 10-кратной лупы. Негативы были расположены на просмотрном столике с люминесцентными лампами дневного света. В каждом ряду выбирался негатив, в котором можно было прочитать наибольшее число строк текста (оптимальная экспозиция  $H_{\text{опт}}$ ). Заключение всех наблюдателей были одинаковыми.

Одновременно для той же экспозиции  $H_{\text{опт}}$  определяли максимальные пространственные градиенты  $\left(\frac{dc'}{dx}\right)_{\max}$  путем микрофотометрирования изображения края полуплоскости.

Для серо-пурпурных изображений, полученных экспонированием белым светом, измерения производили в белом свете и находили значения  $\left(\frac{dD}{dx}\right)_{\max}$ .

Результаты сопоставления значений градиента  $\left(\frac{dc'}{dx}\right)_{\max}$  и соответственно  $\left(\frac{dD}{dx}\right)_{\max}$  в двух параллельных независимых опытах и значений

фактора читаемости негативных изображений  $\frac{1}{h_{\min}}$  представлены в табл. 3.

Сопоставление максимальных пространственных градиентов негативных цветных изображений и их факторов читаемости

Экспонирующий свет	Цвет изображения	$\left(\frac{dc'}{dx}\right)_{\max}$ , мм <sup>-1</sup>		$\left(\frac{dD}{dx}\right)_{\max}$ , мм <sup>-1</sup>		$\frac{1}{h_{\min}}$ , мм <sup>-1</sup>
		1-й опыт	2-й опыт	1-й опыт	2-й опыт	
Выделяющийся	Желтый.	30	26	—	—	20
	Пурпурный.	20	20	—	—	14
	Голубой.	18	18	—	—	9
Белый.	Серо-пурпурный.	—	—	16	17	14

Ряд сильно увеличенных позитивных отпечатков с пурпурных негативных изображений (черные буквы на зеленом фоне) дал то же значение фактора читаемости, что и негативное изображение.

Мы видим, что между обеими характеристиками свойств края фотографического изображения полуплоскости на многослойной пленке имеет место удовлетворительное, учитывая ограниченность экспериментального материала, соответствие.

### Выводы

1. Резкость края цветного фотографического изображения на многослойной пленке физически характеризуется триадой пограничных кривых, описывающих распределение поверхностной концентрации красителя в каждом элементарном изображении края полуплоскости. Описан метод получения пограничных кривых цветных изображений.

2. Вид пограничных кривых однокрасочных изображений на многослойной и однослойных пленках зависит от экспозиции и длительности цветного проявления так же, как и для черно-белых материалов. В то же время для изображений на многослойной пленке имеет место дополнительный эффект, обусловленный особенностями кинетики цветного проявления многослойных пленок: крутизна пограничных кривых возрастает по мере перехода от белого, экспонирующего все три слоя света к выделяющему свету, экспонирующему тот или иной элементарный слой пленки.

3. Величины максимального пространственного градиента, характеризующего крутизну пограничной кривой, находятся в удовлетворительном соответствии с фактором читаемости текстовых изображений на многослойной пленке. Таким образом, пограничные кривые могут, при надлежащей постановке опыта, служить физической мерой субъективного восприятия резкости цветного фотографического макроизображения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Гороховский, П. Х. Прусс, Журн. техн. физики, 25, 221—235, 1955.
2. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 290—296, 1962.
3. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, настоящий сборник, 58.
4. Ю. К. Вифанский, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 12, 29—32, 1960.
5. Ю. Н. Гороховский, Г. Л. Пекарская, Усп. научн. fotogr., VIII, 248—255, 1962.
6. Ю. Н. Гороховский. Спектральные исследования фотографического процесса. Физматгиз, М., 1960.
7. P. R. Mauge, Sci. Ind. Phot., 7, 297—304, 1936.
8. ГОСТ 2819—45. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод резольвометрического испытания.

Г. А. ИСТОМИН

## ОБЪЕКТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ

(АВТОРЕФЕРАТ)

Наиболее актуальной задачей в общей проблеме количественной оценки качества фотографирующей системы или отдельных ее звеньев — фотографического материала, объектива и т. п. — является установление четкой взаимосвязи между результатами объективных измерений и визуальным восприятием изображения. Конечной целью здесь должно быть отыскание простейшего численного критерия качества изображения.

Для решения этой задачи было произведено сопоставление результатов испытаний 25 образцов негативных кинофотоматериалов, изготовленных в различных странах (СССР, Англия, Бельгия, США, Франция, Япония и др.), двумя принципиально различными методами. Первый основан на визуальном восприятии и является субъективным методом. Он воспроизводит, исключая роль оптической системы, условия практической съемки типичного сюжета и визуальную оценку проработки деталей фотографического изображения наблюдателем. Этот метод позволяет получить количественную характеристику информационной способности фотографического материала в отношении полноты передачи деталей объекта съемки.

Второй метод является инструментальным, не зависящим от визуального восприятия изображения; он характеризует физические свойства светочувствительного слоя, обусловленные рассеянием и отражением света. Эти свойства фотографического слоя можно описать преобразованием изображения бесконечно тонкой светящейся линии в полосу с некоторым распределением энергии. В свою очередь, это распределение можно количественно охарактеризовать шириной полосы размытия, при которой интенсивность на ее краях уменьшится в заданной степени по сравнению с интенсивностью в центре светящейся линии.

Установлено, что наилучшая корреляция между субъективной и инструментальной оценками достигается в том случае, когда в качестве численного критерия используется эффективная ширина полосы размытия, при которой интенсивность на ее краях снижается до 1/10 от интенсивности в центре. При применении других параметров, измеряющих полосу размытия выше или ниже указанного уровня (при уменьшении интенсивности соответственно до 1/3 и 1/20), коэффициент корреляции резко ухудшается.

Использованная нами объективная методика фотографической диффузиметрии основывается на измерении функции контрастности для серии черных полосок различной ширины, расположенных на светлом фоне. Легко показать, что вид этой функции зависит от распределения энергии в изображении светящейся линии и что эффективная ширина полосы раз-

мытия соответствует ширине черной полосы при величине функции контрастности, равной, в логарифмической мере, минус единице.

Эта характеристика, названная диффузметрическим коэффициентом  $K_p$ , измеряется в микронах и может служить надежным и простым численным критерием качества изображения. Величина  $K_p$  находится в хорошем соответствии с субъективной (визуальной) оценкой свойств кинофотоматериалов; коэффициент корреляции в данном случае составляет  $-0.64 \pm 0.18$ . По ряду соображений визуальное восприятие зоны перехода между деталью и окружающим фоном, как и психофизиологический эффект резкости изображения, должно быть обратно пропорциональным квадрату величины  $K_p$ . Это предположение подтверждается соответствующим увеличением коэффициента корреляции, достигающего  $-0.77 \pm 0.08$ .

Еще большее соответствие между объективным критерием и информационной способностью наблюдается в том случае, когда одновременно учитывается, также объективно измеренная, зернистость проявленного почернения. Совместный учет этих факторов повышает коэффициент корреляции до  $\pm 0.85 \pm 0.06$ . Следует отметить, что сопоставление количественной характеристики информационной способности исследованных кинофотоматериалов с их разрешающей способностью (мира абсолютного контраста, апертура объектива резольвометра 0.2) дает существенно меньшее значение коэффициента корреляции:  $+0.46 \pm 0.19$ .

Наличие рассмотренных выше взаимосвязей позволяет более уверенно и широко применять объективные методы оценки изобразительных свойств фотокиноматериалов и фотографирующей системы объектив—фотографический слой. Для передаточной (частотно-контрастной) функции наш объективный критерий (величина  $K_p$ ) соответствует измерению частоты штрихов решетки при коэффициенте передачи контраста, равном 0.80. Учитывая, что для современных негативных фотоматериалов величина  $K_p$  находится в пределах приблизительно от 20 до 60 мк, это соответствует частотам от 18 до 6 мм<sup>-1</sup>. Такой диапазон частот примерно на порядок ниже разрешающей способности этих материалов. В значительной степени именно благодаря этому и достигается существенно лучшее соответствие между величиной  $K_p$ , визуальным восприятием деталей и резкостью изображения, чем при использовании данных стандартной резольвометрической методики.

Г. А. ИСТОМИН, И. Г. АБИДИНА, З. Л. ПЕТРУШКИНА

## ФУНКЦИЯ КонтРАСТНОСТИ ЧЕРНО-БЕЛЫХ И ЦВЕТНЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РЕЗКОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ (АВТОРЕФЕРАТ)

Общими для всех фотокиноматериалов независимо от области их применения являются физические свойства эмульсионных слоев, проявляющиеся в рассеянии света и его отражении от подложки. Этим, в сочетании с условиями экспонирования и проявления, определяются изменение фотографического контраста деталей и резкость изображения. В случае весьма мелких деталей, близких к пределу разрешения фотографического материала, преобладающее влияние оказывает диффузный ореол, в то время как в случае более крупных деталей и для краевой резкости изображения существен ореол отражения.

Для объективной оценки физических свойств фотографических материалов до последнего времени использовались в основном два метода измерений и соответственно два типа тест-объектов. Первый, наиболее развитый Фризером, основан на определенной математической зависимости, описывающей рассеяние света в эмульсионном слое. Это позволяет ограничиться фотографическим фотометрированием изображения линейного тест-объекта в виде одной полосы постоянной ширины. В данном методе весьма существенной является возможность количественной оценки фотографического материала при помощи одной константы, зависящей только от рассеяния света эмульсионным слоем. Во втором методе в качестве тест-объекта применяется серия решеток с частотой, изменяющейся в достаточно широких пределах. Обработка результатов измерений по второму методу не связана с заранее заданной математической аппроксимацией и характеризует чисто эмпирическую зависимость — передаточную функцию фотографического материала.

Созданная в НИКФИ методика основывается на фотографическом фотометрировании изображения серии черных полосок, расположенных на светлом фоне. Такой метод позволяет использовать положительные стороны обоих способов измерений. Результаты измерений выражаются в виде функции контрастности, представляющей эмпирическую зависимость фотографического контраста изображения черных полосок от их ширины. Эта функциональная зависимость дает количественную характеристику физических свойств фотографических материалов, обусловленных рассеянием света и его отражением от подложки. Измеряется фотографический эффект, непосредственно связанный с указанными факторами. Вместе с тем принятая в данной методике графическая интерпретация функции контрастности позволяет легко

аппроксимировать ее математически, в первом приближении при помощи одного или, более точно, трех параметров.

Функция контрастности находится в простой взаимосвязи с объективной оценкой краевой резкости фотографического изображения. Зная характеристическую кривую фотографического материала и его функцию контрастности легко вычислить или определить графическим построением распределение оптической плотности для случая, когда одна половина светочувствительного слоя закрыта от действия света непрозрачным экраном. Пограничные кривые, полученные таким способом, хорошо совпадают с непосредственными измерениями распределения оптической плотности при помощи микрофотометра. Это соответствие наблюдается при различных условиях экспонирования для черно-белых и цветных материалов.

Протяженность зоны перехода между освещенным и экранированным от действия света участком непосредственно связана с диффузметрическим коэффициентом  $K_p$ . На расстоянии, равном  $\frac{K_p}{2}$  от границы экрана, интенсивность рассеянного света составляет  $\frac{1}{20}$  от интенсивности, действовавшей на неэкранированную часть слоя. Можно показать, что визуальное восприятие резкости изображения при прочих равных условиях обратно пропорционально квадрату величины  $K_p$ . Таким образом, эта простейшая численная характеристика физических свойств фотографических материалов дает весьма удобную для практики оценку резкости изображения.

В качестве экспозиционного прибора для получения функции контрастности применяется серийный сенситометр ЦС-2 в сочетании со специальным тест-объектом. Измерения диффузграмм производятся на обычном микрофотометре типа МФ-2. Это позволяет реализовать данную методику не только на предприятиях киноплёночной промышленности, но и в любой исследовательской лаборатории. Использование для характеристики физических свойств фотографических материалов функции контрастности дает достаточную для практики точность измерений (порядка  $\pm 5\%$ ) и сравнимые для различных фотографических слоев результаты независимо от их назначения и коэффициента контрастности. Это позволяет получить количественную характеристику свойств кинофотоматериалов, знание которой необходимо при их изготовлении и применении в различных случаях практики: в художественной и технической фотографии, кинематографии, фотографической записи звука, репродукционной фотографии и т. п.

В. Г. КОМАР

## КРИТЕРИЙ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕЕ ОЦЕНКА В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ КИНЕМАТОГРАФИИ

В статье изложена попытка создать метод количественной оценки всего кинематографического процесса и его отдельных звеньев в отношении резкости изображения. Описанный метод использован для оценки различных систем кинематографии по важнейшим показателям их изобразительных качеств: угловым размерам экрана и резкости изображения.

Известно, что свойства того или иного звена кинематографического процесса, определяющие резкость результирующего изображения на экране кинотеатра, могут быть количественно выражены с помощью частотно-контрастной характеристики этого звена [1—5].

Как известно, частотно-контрастная характеристика представляет собой зависимость частотно-контрастной функции  $y$  от пространственной частоты  $p$

$$y = y(p). \quad (1)$$

При этом частотно-контрастная функция  $y$  показывает, как уменьшается модуляция яркости изображения, получаемого в данном звене кинематографического процесса, например при проекции, или как уменьшается модуляция коэффициента пропускания изображения на пленке для данного звена с увеличением пространственной частоты  $p$ . Пространственная частота  $p$  равна обратной величине периода (шага) гармонического изменения яркости изображения (или коэффициента пропускания) вдоль предмета и измеряется в обратных миллиметрах. Функция  $y$  не имеет размерности и снижается от единицы до нуля с ростом пространственной частоты  $p$  от нуля до бесконечности.

Для количественной оценки роли отдельных звеньев кинематографического процесса в результирующей резкости изображения, рассматриваемого зрителем на экране, удобно аппроксимировать частотно-контрастную характеристику следующим эмпирическим уравнением:

$$y = e^{-\left(\frac{p}{p_0}\right)^n}, \quad (2)$$

где  $p_0$  и  $n$  — параметры данной частотно-контрастной характеристики соответственно критическая пространственная частота и показатель степени.

Полученные экспериментальным и расчетным путем частотно-контрастные характеристики различных звеньев кинематографического процесса

хорошо аппроксимируются формулой (2) (рис. 1); показатель степени в этой формуле находится в пределах

$$n = 1.2 \div 2.5. \quad (3)$$

Как видно из формулы (2), при пространственной частоте, равной критической, частотно-контрастная функция уменьшается в  $e$  раз, т. е.

$$y_e = 0.368 \text{ при } p = p_e. \quad (4)$$

Поэтому, если известна частотно-контрастная функция, полученная, например, экспериментальным путем, то можно легко найти критическую частоту  $p_e$ , воспользовавшись условием (4). При этом нетрудно

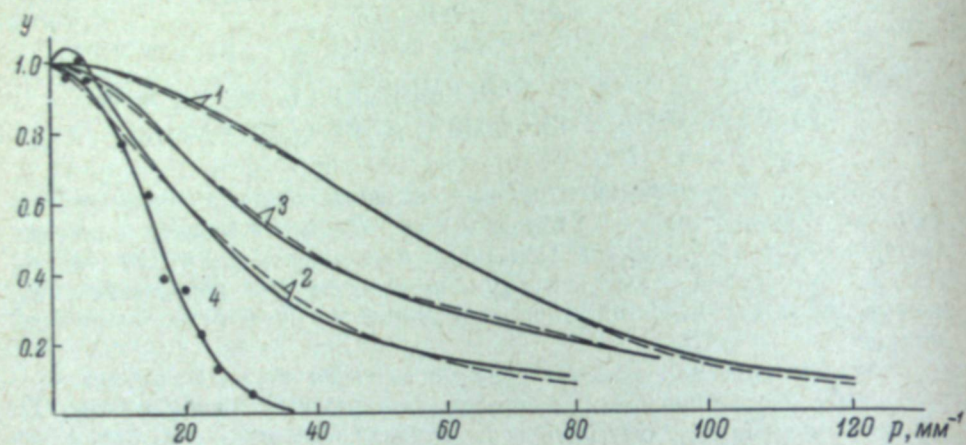


Рис. 1. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (прерывистые линии) частотно-контрастные характеристики.

1 — кино съемочный объектив типа ОКС1-50-1 (по данным А. Г. Болтянского, Ф. С. Новика и Н. И. Тельнова),  $p_e = 61.3 \text{ мм}^{-1}$ ,  $n = 1.84$ ; 2 — цветная негативная пленка Истмен-колер 5250 [4],  $p_e = 34 \text{ мм}^{-1}$ ,  $n = 1.3$ ; 3 — цветная позитивная пленка Истмен-колер 5282 [4],  $p_e = 52 \text{ мм}^{-1}$ ,  $n = 1.2$ ; 4 — съемка и печать фильмокопии с негатива на аппаратуре промышленного типа [2],  $p_e = 18.6 \text{ мм}^{-1}$ ,  $n = 2.45$ .

найти также параметр  $n$  из следующего соотношения, которое можно просто получить из формулы (2):

$$n = \frac{p_e}{p_{\text{кас.}} - p_e}, \quad (5)$$

где  $p_{\text{кас.}}$  — значение пространственной частоты, соответствующей отрезку, отсекаемому на оси  $p$  касательной к кривой  $y = y(p)$  в точке  $p = p_e$  (рис. 2).

Изменение параметра  $n$  вызывает изменение наклона частотно-контрастной характеристики (рис. 2). При этом для неизменного значения  $p_e$  изменение параметра  $n$  в обычных пределах (3) мало меняет площадь  $Q_p$ , ограниченную частотно-контрастной характеристикой и осями координат.

Можно показать, пользуясь уравнением (2), что эта площадь равна

$$Q_p = p_e \Gamma \left( 1 + \frac{1}{n} \right). \quad (6)$$

При этом гамма-функция  $\Gamma \left( 1 + \frac{1}{n} \right)$  в данном соотношении меняется в пределах лишь  $\pm 2\%$  в случае изменения  $n$  в обычном диапазоне (3). В среднем

$$Q_p \cong 0.915 p_e. \quad (7)$$

Можно приближенно считать, что кинематографический процесс является линейным, т. е. что между яркостью исходного объекта и яркостью соответствующего изображения, полученного в данном кинематографическом процессе (или между коэффициентами пропускания исходного и полученного изображения на пленке), имеет место линейная зависимость.

Наиболее сильно обнаруживаются в кинематографическом процессе нелинейные свойства кинопленок; однако, как было, например, показано [6], влияние этой нелинейности не очень велико и в первом приближении им можно пренебречь.

Путем несложных преобразований, пренебрегая влиянием нелинейности кинематографического процесса, можно показать, что справедливо следующее соотношение:

$$\Delta_{\text{эф.}} = \frac{0.5}{Q_p}, \quad (8)$$

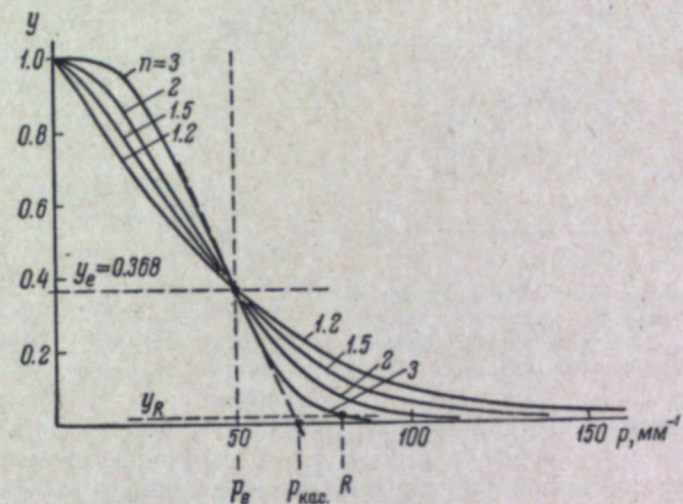


Рис. 2. Расчетные частотно-контрастные характеристики, вычисленные по эмпирическому уравнению (2) для критической частоты  $p_e = 50 \text{ мм}^{-1}$  при разных значениях показателя степени  $n$ .

или, согласно (7)

$$\Delta_{\text{эф.}} \cong \frac{0.55}{p_e}. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta_{\text{эф.}}$  — эффективная ширина зоны постепенного изменения яркости (или коэффициента пропускания) изображения, получаемого в данном кинематографическом процессе (например, при съемке) в случае скачкообразного изменения яркости (или коэффициента пропускания) исходного предмета (например, снимаемого на пленку)

$$\Delta_{\text{эф.}} = \frac{B_2 - B_1}{\left( \frac{dB}{dx} \right)_0}, \quad (10)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  — яркости изображения по краям зоны постепенного изменения яркости;  $\left( \frac{dB}{dx} \right)_0$  — градиент яркости в середине зоны (рис. 3).

Из соотношения (9) видно, что критическая пространственная частота  $p_e$  может быть удобным критерием для количественной оценки резкости изображения в кинематографии, так как она определяет ширину зоны постепенного изменения яркости изображения границы предмета, который имеет совершенно резкие очертания.

Критическая частота  $p_c$  в лучшей мере, чем разрешающая способность  $R$ , характеризует резкость изображения. Если пространственная частота  $p$  достигает значения, равного разрешающей способности  $R$ , частотно-контрастная функция  $y$  снижается до величины  $y_R$ , при которой изменения яркости рассматриваемого изображения являются едва различимыми (см. рис. 2).

Если принять, что в зависимости от методов и аппаратуры, применяемых для определения разрешающей способности, величина  $y_R$  может меняться в пределах примерно от 0.02 до 0.1, а показатель степени  $n$  от 1.2 до 2.5, то, согласно формуле (2), соотношение между разрешающей способностью  $R$  и критической частотой  $p_c$  может изменяться в пределах

$$\frac{R}{p_c} \cong 1.2 \div 4; \quad (11)$$

при  $n = 2$  и  $y_R = 0.02$

$$\frac{R}{p_c} = 2.$$

Эти результаты соответствуют известной из практики возможности оценки резкости изображения с помощью критерия  $R$  — разрешающей способности. Однако при такой оценке возможны значительные ошибки.

Если известны частотно-контрастные функции нескольких звеньев кинематографического процесса  $y_1, y_2, y_3 \dots$  (например, съемки, печати и др.), то результирующая частотно-контрастная функция сложного процесса  $y$ , включающего эти звенья, как известно, равна

$$y = y_1 y_2 y_3 \dots \quad (12)$$

При этом пространственные частоты отдельных звеньев кинематографического процесса должны быть приведены к одному звену. Такое приведение удобно, например, выполнить по отношению к пленке, находящейся в кинопроекторе. В этом случае значения показателя степени  $n$  характеристики, конечно, не изменяются, а критические частоты отдельных звеньев  $p_{c1}, p_{c2}, p_{c3} \dots$  умножаются на соответствующие значения оптических увеличений по отношению к пленке  $M_1, M_2, M_3 \dots$ , т. е.

$$p_{c1} = M_1 p_{c1}; \quad p_{c2} = M_2 p_{c2}; \quad p_{c3} = M_3 p_{c3} \dots \quad (13)$$

Здесь  $p_{c1}, p_{c2}, p_{c3} \dots$  — критические пространственные частоты отдельных звеньев кинематографического процесса, приведенные к пленке в кинопроекторе.

Критическая пространственная частота сквозного кинематографического процесса, приведенная к пленке,  $p_E$ , согласно соотношениям (2) и (12) при одинаковых значениях параметра  $n$  частотно-контрастных характеристик отдельных звеньев равна

$$p_E = (p_{c1}^{-n} + p_{c2}^{-n} + p_{c3}^{-n} + \dots)^{-1/n}. \quad (14)$$

Если приближенно принять  $n = 2$ , то уравнение (14) принимает вид

$$p_E = \frac{1}{\left(\frac{1}{p_{c1}^2} + \frac{1}{p_{c2}^2} + \frac{1}{p_{c3}^2} + \dots\right)^{1/2}}. \quad (15)$$

Если частотно-контрастные характеристики нескольких, например двух, звеньев кинематографического процесса совершенно точно выражаются формулами (2), но имеют различные показатели степени ( $n_1$  и  $n_2$ ), то результирующая частотно-контрастная характеристика сквозного процесса, состоящего из этих звеньев, может быть лишь приближенно выражена формулой (2). При этом для приближенного определения пара-

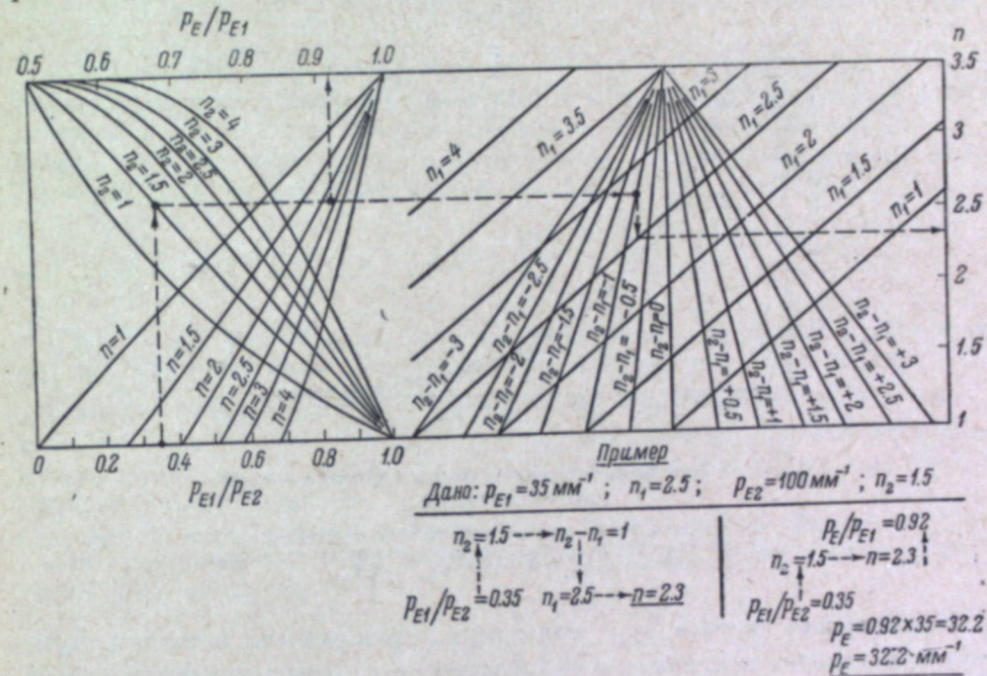


Рис. 4. Номограмма для определения параметров ( $p_E, n$ ) результирующей частотно-контрастной характеристики процесса, состоящего из двух звеньев, параметры частотно-контрастных характеристик которых известны.

метров результирующей характеристики ( $p_E, n$ ) по известным параметрам двух данных характеристик ( $p_{E1}, p_{E2}; n_1, n_2$ ) можно воспользоваться номограммой (рис. 4), которая построена на основе соотношений (2) и (12) для условия

$$y = y_1 y_2 \text{ и } \frac{dy}{dp} = \frac{d(y_1 y_2)}{dp} \text{ при } p = p_{E1}. \quad (16)$$

Здесь  $p_{E1}$  — наименьшая критическая частота двух характеристик данных звеньев с известными параметрами.

Приведенными на рис. 4 номограммами можно воспользоваться для определения параметров частотно-контрастной характеристики сложного процесса, состоящего более чем из двух звеньев, путем последовательного рассмотрения отдельных пар звеньев кинематографического процесса.

Зная критические частоты отдельных звеньев, можно найти критическую частоту для результирующей частотно-контрастной характеристики сквозного кинематографического процесса  $p_E$  от съемки предметов до их

проекции на экране. Эта критическая частота позволяет оценить качество сквозного кинематографического процесса в отношении возможности получения в данном процессе резкого изображения.

Известно, что резкость изображения в кинематографии сильно зависит от условий наблюдения кинофильма. Эти условия можно учесть, если оценить свойства зрительного анализатора (глаза) зрителя с помощью частотно-контрастной характеристики (рис. 5). Параметры такой характеристики ( $p_{e \text{ гл.}}$ ,  $n_{\text{гл.}}$ ) в среднем для яркости изображения около 35 нит могут быть приняты [7] приблизительно равными

$$p_{e \text{ гл.}} = 45 \text{ мм}^{-1}, \quad n_{\text{гл.}} = 1.45. \quad (17)$$

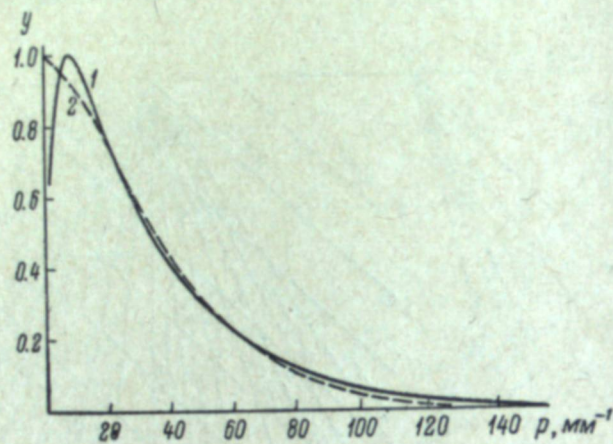


Рис. 5. Частотно-контрастная характеристика зрительного анализатора.

1 — экспериментальные данные для яркости изображения 35 нит [7]; 2 — расчетные данные по эмпирическому уравнению (2) при  $p_{e \text{ гл.}} = 45 \text{ мм}^{-1}$ ,  $n_{\text{гл.}} = 1.45$ .

Критическая частота  $p_{e \text{ гл.}}$  приведена к поверхности сетчатки. Критическая частота зрительного анализатора  $p_{e \text{ гл.}}$ , приведенная к пленке в проекторе, согласно (13), равна

$$p_{e \text{ гл.}} = p_{e \text{ гл.}} f_{\text{гл.}} M_{\theta}. \quad (18)$$

Здесь  $f_{\text{гл.}}$  — фокусное расстояние глаза, мм;  $M_{\theta}$  — угловое увеличение при проекции, равное углу (в радианах), в котором зритель видит на экране часть изображения, соответствующую размеру в один миллиметр на проецируемом фильме.

При этом приблизительно справедливы соотношения

$$M_{\theta} \cong \frac{L_{\text{пр.}}}{f_{\text{пр.}} L_{\text{эр.}}} \quad (19)$$

или

$$M_{\theta} \cong \frac{b_{\text{эк.}}}{b_{\text{пл.}} L_{\text{эр.}}}$$

Здесь  $f_{\text{пр.}}$  — фокусное расстояние проекционного объектива;  $L_{\text{эр.}}$  и  $L_{\text{пр.}}$  — расстояние от экрана соответственно до зрителя и до кинопроектора;  $b_{\text{эк.}}$  и  $b_{\text{пл.}}$  — ширина соответственно экрана и изображения на пленке.

Кинематографический процесс в отношении возможности получения резкого изображения можно более полно оценить, если учесть условия наблюдения фильма. Таким более полным критерием резкости изображения является критическая пространственная частота частотно-контрастной характеристики всего кинематографического процесса, включая характеристику глаза  $p'_E$ .

Для оценки резкости изображения можно пользоваться относительным значением этой критической частоты — величиной  $K'_E$ , которая является критерием резкости изображения с учетом условий наблюдения и равна

$$K'_E = \frac{p'_E}{p_{e \text{ гл.}}}. \quad (20)$$

На практике, однако, удобнее пользоваться величиной  $K_E$ , которая также является критерием резкости изображения с учетом условий наблюдения, но равна частоте сквозного кинематографического процесса от съемки предметов до проекции на экране, отнесенной к критической пространственной частоте глаза,

$$K_E = \frac{p_E}{p_{e \text{ гл.}}}. \quad (21)$$

Очевидно, что максимальным значениям указанных критериев ( $K'_E = 1$ ,  $K_E = \infty$ ) соответствует наилучшая резкость изображения. Кинематографические процессы с такими значениями критериев  $K'_E$  и  $K_E$  были бы идеальными, так как условия восприятия в кинематографии соответствовали бы естественным условиям наблюдения снимаемых оригинальных предметов.

Однако практически равноценными идеальным в отношении резкости являются, очевидно, кинематографические процессы со следующими значениями критериев:

$$K'_E \geq 0.9, \quad K_E \geq 2. \quad (22)$$

Из соотношений (18)—(21) получаем

$$K_E = \frac{p_E}{p_{e \text{ гл.}} f_{\text{гл.}} M_{\theta}}. \quad (23)$$

Если принять  $p_{e \text{ гл.}} = 45 \text{ мм}^{-1}$  (17) и фокусное расстояние глаза  $f_{\text{гл.}} = 16.7 \text{ мм}$ , то получим из (23)

$$K_E = \frac{p_E}{750 M_{\theta}}. \quad (24)$$

Критерий резкости изображения ( $K_E$ ) имеет простой физический смысл; он пропорционален обратной величине угла  $\gamma_E$ , в котором зритель видит элемент изображения, соответствующий периоду (шагу) критической пространственной частоты.

Согласно соотношению (23),

$$K_E = \frac{3440}{p_{e \text{ гл.}} f_{\text{гл.}} \gamma_E}, \quad (25)$$



или, для  $p_{e, \text{гл.}} = 45 \text{ мм}^{-1}$  и  $f_{\text{гл.}} = 16.7 \text{ мм}$ ,

$$K_E = \frac{4.58}{\gamma_E}; \quad (26)$$

здесь  $\gamma_E$  измеряется в минутах.

Интересно отметить, что с увеличением яркости изображения на экране при одних и тех же значениях параметров  $p_E$  и  $\gamma_E$  критерий резкости изображения  $K_E$  снижается за счет некоторого увеличения параметров  $p_{e, \text{гл.}}$ .

Распространено ошибочное мнение, что резкость изображения в кинематографии ограничивает линейное увеличение при проекции. В действительности, как видно из соотношений (23) и (24), не линейное, а угловое увеличение  $M_\theta$  определяет резкость изображения. Значение  $M_\theta$  максимально для зрителей первых рядов кинотеатра. По действующим в настоящее время в стране нормам для кинотеатров, демонстрирующих обычные 35-мм фильмы,  $\frac{L_{\text{сп.}}}{b_{\text{эк.}}} = 1.5$ . Полагая  $b_{\text{пл.}} = 20.9 \text{ мм}$ ,

имеем, согласно (19), для зрителей первых рядов такого кинотеатра:

$$M_\theta = 0.032 \text{ рад./мм} = 1.83 \text{ град./мм.}$$

Если сквозной кинематографический процесс имеет критическую частоту для обычного 35-мм фильма  $p_E = 15 \text{ мм}^{-1}$ , что соответствует разрешающей способности всей системы приблизительно  $R = 30 \text{ мм}^{-1}$ , то для зрителей первого ряда указанные выше критерии резкости изображения равны

$$K_E = 0.63, \quad \gamma_E = 7.3'.$$

При этом визуальное качество изображения в отношении резкости может быть оценено как удовлетворительное. Для зрителей последнего ряда в таком кинотеатре, сооруженном по действующим нормам, для  $\frac{L_{\text{сп.}}}{b_{\text{эк.}}} = 5$  (т. е.  $f_{\text{пр.}} = 105 \text{ мм}$ )  $M_\theta = 0.0096 \text{ рад./мм}$  ( $= 0.55 \text{ град./мм}$ ),

$$K_E = 2.1, \quad \gamma_E = 2.2'. \quad (27)$$

При этом качество изображения в отношении резкости может быть оценено как отличное.

Соотношение (19) можно представить в виде

$$\text{tg } \frac{\alpha}{2} \cong 0.5 b_{\text{пл.}} M_\theta, \quad \text{tg } \frac{\beta}{2} \cong 0.5 h_{\text{пл.}} M_\theta. \quad (28)$$

Здесь  $\alpha, \beta$  — соответственно горизонтальный и вертикальный углы, в которых зритель видит изображение на экране;  $b_{\text{пл.}}, h_{\text{пл.}}$  — соответственно ширина и высота изображения кадра на пленке.

Из соотношений (24) и (28) видно, что при сохранении качества изображения в отношении его резкости  $K_E$  возможны два пути увеличения угловых размеров изображения: увеличение размеров кадра на пленке  $b_{\text{пл.}} \times h_{\text{пл.}}$  и повышение критической частоты всего кинематографического процесса  $p_E$ . Другой возможный путь увеличения угловых размеров изображения на экране заключается в использовании нескольких пленок для одновременной проекции фильма.

В системах с анаморфированием угловое увеличение изображения и критические частоты для горизонтального ( $M_{\theta, \text{гр.}}$  и  $p_{E, \text{гр.}}$ ) и вертикального ( $M_{\theta, \text{вр.}}$  и  $p_{E, \text{вр.}}$ ) направлений оказываются различными. Можно

приблизительно принять, что восприятие изображения как резкого определяется при этом эквивалентной критической частотой  $p_E$ , равной

$$p_E \cong \sqrt{p_{E, \text{гр.}} p_{E, \text{вр.}}}$$

и эквивалентным угловым увеличением изображения

$$M_\theta \cong \sqrt{M_{\theta, \text{гр.}} M_{\theta, \text{вр.}}} \quad (30)$$

Отсюда аналогично (19) можно получить следующие соотношения:

$$M_\theta = \frac{L_{\text{пр.}} \sqrt{A}}{f_{\text{пр.}} L_{\text{сп.}}} \quad (31)$$

или

$$M_\theta = \frac{b_{\text{эк.}}}{b_{\text{пл.}} L_{\text{сп.}}} \frac{1}{\sqrt{A}}.$$

Здесь  $A$  — коэффициент анаморфозы (при растяжении изображения при проекции коэффициент имеет значение больше единицы).

Определив эквивалентные значения  $p_E$  и  $M_\theta$  по формулам (29) и (31), можно воспользоваться для оценки резкости изображения в системах кинематографа с анаморфотной оптикой приведенными выше соотношениями (23), (24) и (26), полученными для систем без анаморфирования.

Угловые размеры изображения на экране при применении анаморфотной оптики в соответствии с формулой (31) будут определяться вместо соотношения (28) следующими выражениями:

$$\text{tg } \frac{\alpha}{2} \cong 0.5 b_{\text{пл.}} M_\theta \sqrt{A}, \quad \text{tg } \frac{\beta}{2} \cong 0.5 h_{\text{пл.}} M_\theta \frac{1}{\sqrt{A}}. \quad (32)$$

Здесь  $M_\theta$  выражено в радианах на миллиметр.

Из соотношения (32) видно, что в системах кинематографа с анаморфотной оптикой из условий соблюдения требуемой резкости изображения увеличение угловых размеров изображения по горизонтали, получаемое за счет анаморфирования, требует соответствующего уменьшения угловых размеров по вертикали, так что общая площадь изображения на экране должна приблизительно сохраняться неизменной.

В таблице приведены вычисленные значения угловых размеров изображения для различных систем кинематографа. Эти значения определены для равных угловых увеличений изображения  $M_\theta = 0.032 \text{ рад./мм}$ , что может иметь место при одинаковых значениях критериев резкости изображения  $p_E$  и  $K_E$ .

Приведенные данные могут быть несколько уточнены с учетом определенного различия между значениями критических частот  $p_E$  для разных систем кинематографа.

Таблица иллюстрирует практически важное положение, что узкопленочные системы кинематографа вне зависимости от абсолютных размеров помещения, где демонстрируется фильм, не могут обеспечить достаточно больших угловых размеров экрана без существенной потери резкости изображения (снижения  $K_E$ ) или без принятия специальных мер по значительному повышению критической пространственной частоты  $p_E$  системы.

Возникновение и практическое применение широкоэкранного, широкоформатного и панорамного кинематографа показывает, что увеличе-

Угловые размеры изображения на экране для зрителей в различных системах кинематографа при одинаковых значениях углового увеличения изображения  $M_0 = 0.032$  рад./мм

Система кинематографа	Размеры проецируемой части кадра на фильмокопии $b_{пл.} \times h_{пл.}$ , мм	Углы, в которых зритель видит изображение на экране	
		по горизонтали $\alpha$ , град.	по вертикали $\beta$ , град.
8-мм узкоплечный . . . . .	$4.37 \times 3.28$	8	6
16-мм узкоплечный . . . . .	$9.7 \times 7.26$	18	13
35-мм обычный * . . . . .	$20.9 \times 15.2$	37	26
35-мм широкоэкранный с коэффициентом анаморфозы, равным 2 . . . . .	$23.1 \times 18.1$	55	23
70-мм широкоформатный . . . . .	$48.6 \times 22$	76	39
$3 \times 35$ -мм панорамный . . . . .	$24 \times 27.5 (\times 3)$	126	47
$3 \times 70$ -мм (предполагаемая система со сверхбольшими горизонтальными и вертикальными угловыми размерами изображения) . . . . .	$51 \times 56 (\times 3)$	235	83

ние угловых размеров экрана является прогрессивной тенденцией в развитии новых видов кинематографа, которая ведет к расширению его изобразительных возможностей. В связи с этим можно ожидать возникновения совершенно новых систем кинематографа с еще большими угловыми размерами изображения. Пойдет ли такое развитие по пути возрастания размеров кадра на пленке за счет увеличения ее ширины, скорости движения и числа пленок или же оно будет достигнуто значительным совершенствованием технических средств кинематографа, т. е. улучшением частотно-контрастных характеристик кинематографического процесса при сохранении размеров кадров на пленке?

Несмотря на большие возможности указанного совершенствования кинематографического процесса, автор все же полагает, что в ближайшие годы можно ожидать возникновения новых видов кинематографии с еще большими размерами кадра на пленке, чем в известных системах, так как улучшение частотно-контрастных характеристик (увеличение  $p_E$ ), по-видимому, целесообразнее будет реализовать в направлении улучшения резкости изображения  $K_E$  и повышения качества изображения за счет его яркости.

Изложенные в настоящей статье положения о резкости изображения в кинематографии основаны на геометрических соотношениях. Дальнейшая экспериментальная проверка должна показать, в какой мере следует учитывать психофизиологические факторы, которые, как известно, существенно влияют на восприятие изображения в кинематографе. Есть, однако, основания полагать, что влияние этих факторов может быть учтено в виде поправок к приведенным здесь соотношениям, полученным главным образом на основе геометрических представлений.

### Выводы

1. Частотно-контрастная характеристика как отдельных звеньев, так и всего кинематографического процесса, а также зрительного анализатора человека может быть достаточно точно выражена эмпирической экспоненциальной степенной функцией  $y = e^{-\left(\frac{p}{p_0}\right)^n}$ .

\* Расстояние от зрителя первого ряда до экрана принято для 35-мм обычного кинематографа равным  $L_{зр.} = 1.5 b_{эк.}$ .

2. Ширина зоны постепенного изменения яркости контура изображения, обуславливающая степень его резкости, обратно пропорциональна критическому значению пространственной частоты кинематографического процесса  $p_c$ , т. е. такому значению пространственной частоты, при котором частотно-контрастная функция  $y$  уменьшается в  $e$  раз. В связи с этим величина  $p_c$  предложена в качестве критерия резкости изображения; она может количественно характеризовать данную систему кинематографа (совокупность его технических средств) в отношении возможности получения определенной степени резкости изображения.

3. Визуальное восприятие изображения как резкого в кинематографии может количественно оцениваться критерием резкости  $K_E$ , равным отношению критических пространственных частот всего кинематографического процесса и зрительного анализатора, приведенных по оптическому увеличению к позитиву фильма  $K_E = \frac{p_E}{p_{Eгл.}}$ .

4. Критерий резкости изображения  $K_E$  обратно пропорционален угловому увеличению при проекции кинофильмов  $M_0$ , т. е. углу, в котором зритель видит изображение на экране, соответствующее участку на позитиве фильма, равному 1 мм.

5. Угловые размеры экрана в кинематографе при сохранении необходимой резкости изображения могут быть увеличены за счет возрастания размеров кадра на позитиве фильма и за счет увеличения критической пространственной частоты кинематографического процесса. Применение анаморфотной оптики при прочих равных условиях позволяет увеличить размер экрана только по горизонтали за счет соответствующего уменьшения размера по вертикали или же, наоборот, увеличить вертикальный размер экрана за счет снижения его горизонтального размера.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Истомин. Техника кино и телевид., 5, вып. 2, 1, 1961.
2. Ф. Перрен, Усп. физ. наук, 78, 307, 1962.
3. R. M. Scott, Phot. Sci. a. Eng., 3, 201, 1951.
4. E. M. Crain. An Objective Method for Rating Picture Sharpness. 89 SMPTE Convention Toronto, Canada, 1961.
5. A. J. Hill, J. Opt. Soc. Amer., 46, 691, 1951.
6. R. L. Lamberts, J. Opt. Soc. Amer., 51, 982, 1961.
7. O. H. Schade, J. Opt. Soc. Amer., 46, 721, 1956.

В. А. КОРНДОРФ, П. А. ЧЕРНЫЙ

## О СТАНДАРТИЗАЦИИ РЕЗОЛЬВОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Разрешающая способность фотографического материала выражает его способность передавать мельчайшие детали оптического изображения.

В нашей стране метод измерения разрешающей способности стандартизован и изложен в ГОСТе 2819—45 [1]. С момента выхода ГОСТа прошло уже около двух десятилетий. За это время требования к оценке разрешающей способности значительно выросли и ГОСТ, сыгравший свою положительную роль, в настоящее время устарел и требует пересмотра. Так, например, устарела рекомендация применения резольвметров с объективом, имеющим апертуру  $A=0.1$ .

За последние годы выполнено много работ [2—8], посвященных различным вопросам резольвметрии и разработке новых типов проекционных резольвметров, в которые внесены принципиальные и конструктивные улучшения.

А. Т. Ащеуловым с сотрудниками разработан резольвметр СР-13, на котором были выполнены исследования разрешающей способности ряда фотографических материалов в зависимости от величины апертуры объектива. Измерения выполнены для практически безабберационного объектива с апертурами: 0.075, 0.10, 0.15, 0.24 и 0.30. Оказалось, что разрешающая способность фотографического материала увеличивается с ростом апертуры объектива до некоторого максимального значения. При дальнейшем увеличении апертуры разрешающая способность начинает падать.

В настоящее время в промышленности используются типы проекционных резольвметров с объективами, имеющими апертуру 0.2 или редко 0.1. В последние годы ГОИ выпущены небольшие серии резольвметров СР-13 с апертурой до 0.3 и СР-17 с объективами, имеющими апертуру 0.2 и 0.3. Применение резольвметров с объективами, имеющими разную апертуру, приводит к нарушению единства резольвметрических измерений в стране.

Настоящая работа выполнена с целью рекомендации единой величины апертуры и типа объектива для резольвметрических измерений. Исследования зависимости величины разрешающей способности фотографического материала от величины апертуры объектива были нами проведены в широком интервале апертур: от 0.07 до 0.65.

Для выяснения влияния типа объектива на результат резольвметрических измерений в резольвметре ВНИИМ применены три высококачественных микрообъектива: два апохромата типа ОС-16 и ОС-8 с апертурами, соответственно, 0.3 и 0.65 и один планахромат с апертурой 0.5. Некоторые данные этих объективов приведены в таблице.

Тип микрообъектива	Фокусное расстояние, мм	Апертура $A$	Светосила	Теоретическая разрешающая способность $R = 3000 A$ , мм <sup>-1</sup>
Апохромат ОС-16 . . .	15.7	0.30	1:1.66	900
Планахромат ОХ-10 . .	10.2	0.50	1:1.0	1500
Апохромат ОС-8 . . . .	8.37	0.65	1:0.77	1950

Замена микрообъектива в резольвметре производится без нарушения юстировки и фокусировки прибора. Использование в резольвметре ирисовой диафрагмы позволяет постепенно менять апертуру каждого микрообъектива от минимальной до номинальной величины. Ирисовая диафрагма расположена в приборе на близком расстоянии от задней линзы микрообъектива. Площадь отверстия ирисовой диафрагмы изменяется пропорционально углу поворота установочного кольца. Численное значение апертуры каждого микрообъектива отсчитывается по шкале с нониусом.

Экспериментальные кривые зависимости апертуры микрообъективов ОС-16, ОХ-10 и ОС-8 от установки ирисовой диафрагмы по шкале, имеющей

34 произвольных деления, приведены на рис. 1. Точность установки диафрагмы равна 0.1 деления шкалы. Градуировочные кривые для объективов получены двумя независимыми методами: при помощи апертметра Аббе [9] и измерением диаметров ирисовой диафрагмы на универсальном микроскопе. Из рис. 1 видно, что результаты измерений совпадают между собой хорошо.

Для нахождения зависимости величины разрешающей способности светочувствительных слоев от величины апертуры объектива был исследован ряд фотографических материалов отечественного и иностранного изготовления. На рис. 2 и 3 приведены результаты исследований для семитипов фотографических материалов.

С ростом апертуры объектива разрешающая способность высококачественных материалов (пластинки изготовления ВНИИМ [10], пленка Микрат-600) сильно увеличивается; при достижении апертуры около 0.3 она достигает максимальной величины и затем, при дальнейшем увеличении апертуры, начинает резко падать.

Фотографические слои со средней величиной разрешения (пленка Микрат опытная, пленка Микрофайл и пленка Микрокопи фирмы Дюпон)

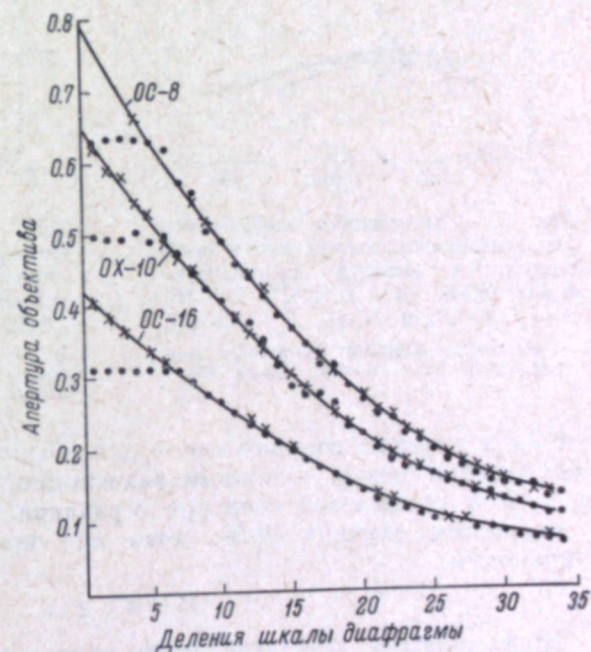


Рис. 1. Зависимость апертуры микрообъективов ОС-16, ОХ-10 и ОС-8 от установки диафрагмы по шкале.

крестики — микроскоп; точки — апертметр Аббе.

имеют подобные, но более пологие зависимости величины разрешающей способности от апертуры объектива. Максимальная величина разрешения достигается при апертуре объектива, близкой к 0.3.

Разрешающая способность фотографических материалов со сравнительно малой величиной разрешения (пленка Микрат-200, пленка Кинонегатив А-2) в меньшей степени зависит от апертуры объектива, но все же максимальное разрешение достигается около апертуры 0.3.

Из рассмотрения кривых рис. 2 и 3 видно, что численное значение разрешающей способности зависит также от типа применяемого объектива. При одной и той же действующей апертуре наивысшее значение разрешающей способности получено для микрообъектива ОС-8 с номинальной апертурой 0.65, несколько ниже — для объектива ОХ-10 с аперту-

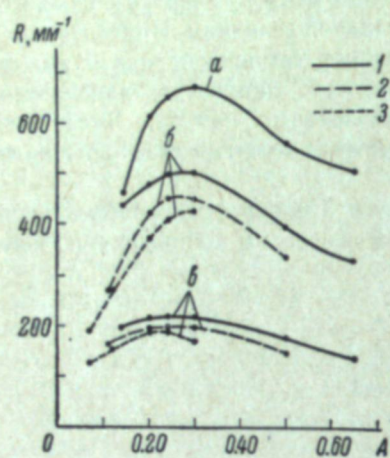


Рис. 2. Разрешающая способность фотографических материалов в зависимости от апертуры микрообъективов ОС-8,  $A = 0.65$  (1); ОХ-10,  $A = 0.50$  (2), и ОС-16,  $A = 0.30$  (3).

а — пластинки ВНИИМ; б — пленка Микрат опытная; в — пленка Микрат-200.

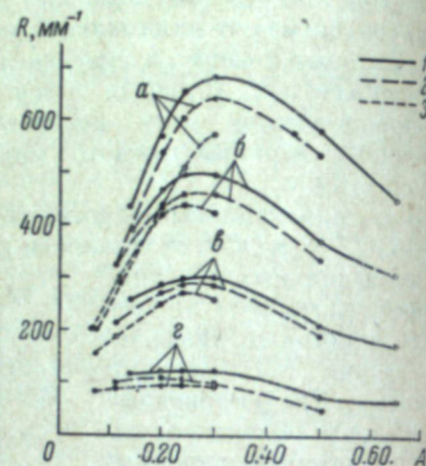


Рис. 3. Разрешающая способность фотографических материалов в зависимости от апертуры микрообъективов ОС-8,  $A = 0.65$  (1); ОХ-10,  $A = 0.50$  (2), и ОС-16,  $A = 0.30$  (3).

а — Микрат-600; б — пленка Микрафайл фирмы Дюпон; в — пленка Микрокопи фирмы Дюпон; г — пленка Кинонегатив А-2.

рой 0.5 и наименьшее значение — для объектива ОС-16 с апертурой 0.3. Расхождения между крайними значениями, соответствующими испытаниям при одинаковой апертуре с различными объективами, достигают в отдельных случаях 20%, хотя вид кривых остается в основном одинаковым.

### Выводы

Целесообразно стандартизовать единое значение апертуры микрообъективов, применяющихся для целей проекционной резольвотрии.

В качестве такого единого значения можно с большим основанием рекомендовать апертуру около 0.3, которой соответствует наибольшая величина разрешающей способности. Наиболее подходящим типом объектива является планопохромат, который имеет практически плоское поле и уменьшенный хроматизм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 2819—45. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод резольвотрического испытания.
2. А. Т. Ащеулов, Б. М. Левин, Т. А. Павличук, Проекционный резольвотри. Описание и инструкция к пользованию. Оборонгиз, М., 1952.

3. А. Т. Ащеулов, Т. А. Павличук, М. Д. Хухрина, Усп. научн. fotogr., IV, 88, 1955.
4. В. А. Коридорф, И. А. Черный, Опт.-мех. промышл., 26, вып. 5, 16, 1959.
5. Nat. Bureau of Standards Techn. News, 44, 204, 1960.
6. В. А. Коридорф, И. А. Черный. Новые измерительные приборы и методы их поверки, вып. 4. Стандартгиз, М., 32, 1961.
7. В. А. Коридорф, И. А. Черный, Тр. институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 56 (116), 118, 1961.
8. В. А. Коридорф, И. А. Черный, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 454, 1961.
9. С. С. Тяжелов. Оптические измерения. Определение конструктивных элементов оптических систем. Оборонгиз, Л.—М., 1939.
10. В. А. Коридорф, И. А. Черный, Тр. институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 56 (116), 124, 1961.

К. С. ЛЯЛИКОВ, Е. Г. ИВКИНА

### ЭНТРОПИЯ АЭРОСНИМКА

В связи с расширением приложений теории информации в оптике и фотографии уже неоднократно ставился вопрос об определении энтропии фотографического изображения [1, 2]. Однако до сих пор не появилось работ, в которых измерялась бы энтропия конкретных фотографических изображений. Проводя различные исследования статистических характеристик аэроснимков и объектов аэрофотографии, мы решили изучить вопрос о рациональности применения понятий теории информации к оценке таких характеристик аэроснимка.

От аэроснимка чаще всего требуется способность воспроизведения наибольшего количества деталей, присутствующих в объекте аэрофотографирования. Поэтому естественно было прежде всего сделать попытку применить для оценки объема информации аэроснимка понятие энтропии изображения. Оно было введено Хартлеем [3], затем широко применялось в теории информации Шенноном [4], а в последние годы начало проникать и в оптические и фотографические работы.

Энтропией называется величина

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \lg_2 P_i. \quad (1)$$

Здесь  $P_i$  — вероятность появления данного сигнала, определяемая по формуле  $P_i = \frac{n_i}{N}$ , где  $n_i$  — число случаев появления данной плотности,  $N$  — общее число измеренных плотностей. В применении к фотографическому изображению  $P_i$  есть вероятность появления в данной точке изображения определенной плотности.

Под точкой мы должны подразумевать ту минимальную площадь (квадрат), которая еще может передаваться отдельно от окружающих ее точек изучаемой системой объектив—слой.

Если допустить, что способность системы передавать отдельно точки определяется разрешающей способностью системы, то можно принять, что в среднем на аэроснимке разрешающая способность системы — около 20 линий на миллиметр. Тогда на протяжении одного миллиметра мы различаем 40 отдельных точек различной плотности.

Таким образом, для определения энтропии аэроснимка размером  $18 \times 18$  см его надо разбить («квантовать») на  $(40 \times 180)^2$  участков, т. е. немного больше чем на 50 миллионов участков. Принятая нами разрешающая способность не является максимальной, а следовательно, часто надо было бы разбивать снимок на еще большее количество участков. Ясно, что задача измерения плотностей на таком количестве участков

является в настоящее время непосильной. Этим, вероятно, и объясняется то, что, несмотря на частые упоминания об энтропии фотографического или оптического изображения, нам не приходилось встречать ни одного определения энтропии какого-либо реального фотографического изображения.

Между тем попытка такого определения несомненно представляет интерес. В теории информации энтропия является общепринятой и удобной мерой объема информации. Вместе с тем очевидно, что одной из основных характеристик аэроснимка является именно объем информации, который он несет в себе. Исходя из того, что энтропия является чисто статистической величиной, мы решили вместо энтропии по всей площади аэроснимка определять энтропию лишь в отдельных прямолинейных сечениях изображения. Такая «линейная» энтропия сравнительно легко может быть определена, и, таким образом, мы получаем возможность приступить к изучению того, насколько удобно применять это понятие для оценки объема информации аэроснимка.

Учитывая несколько условный характер «линейной» энтропии, а также то, что наш микрофотометр позволял проводить измерения не на квадратном участке, а на длинном прямоугольнике размером  $2 \times 200$  мк, для изучения были выбраны объекты, или совершенно однородные по всем направлениям (луг) или отчетливо однородные в одном направлении (гряды распаханного поля, валки сена), перпендикулярно к которому и производились измерения.

Для микрофотометрирования был применен модернизированный микрофотометр МФ-2, оптическая часть которого осталась без изменения. В целях повышения чувствительности прибора фотоэлемент в нем был заменен на фотоумножитель, что позволило производить измерения плотностей до  $D=2$  со щелью указанных выше размеров.

Разрешающая способность микрообъектива микрофотометра с апертурой 0.3 позволяет пользоваться щелью такой ширины. Если бы измеряемый фотографический слой был бесконечно тонким, то такая щель позволила бы измерять и площадку фотографического изображения шириной в 2 мк. Но исследуемый слой пленки Панхром X имеет толщину примерно 20 мк. Поэтому при фокусировке микрообъектива на два—три верхних элементарных слоя ширина измеряемого участка в нижней части слоя составляет примерно 10 мк. Микрофотометрирование проводилось через каждые 10 мк. Для каждого объекта было сделано не менее 400 измерений.

Статистическая обработка данных фотометрирования заключалась в следующем. Измеренные значения оптических плотностей разбивались на классы, отличающиеся на 0.01, 0.02, 0.03 и т. д. После этого определялись вероятности появления плотностей  $P_i$  всех классов. Зная  $P_i$ , по формуле (1) определяли энтропию.

В тех случаях когда мы рассматриваем плотности очень малых участков фотографического изображения, нам приходится считаться с колебаниями плотности, обусловленными зернистостью проявленного изображения. Эти колебания, совершенно не связанные с оптическим изображением, по аналогии со случайными колебаниями тока в линиях передачи, в последнее время часто называют фотографическими шумами. Энтропия, определяемая зернистостью изображения, изучалась неоднократно [5]. Очевидно, что в наших измерениях эти случайные колебания плотности, накладываясь на колебания плотностей изображения, увеличивают энтропию. Поэтому для нахождения объема информации изображения  $I$  необходимо из измеренной энтропии изображения  $H_1$  вычесть энтропию шума  $H_2$ :

$$I = H_1 - H_2.$$

Экспериментальные исследования энтропии шума показали, что она зависит от плотности изображения. Поэтому следовало бы  $H_2$  определять для разных плотностей изображения и учитывать различные величины  $H_2$ . Нам пока не удалось найти такую методику постановки опыта, которая позволяла бы делать это. Поэтому при вычислении  $I$  мы вычитали одно среднее значение энтропии шума  $H_2=1.74$ , определяемое по зернистости участка равномерного почернения на измеряемом аэроснимке. Совершенно ясна условность этого приема учета зернистости.

Было проведено микрофотометрирование нескольких объектов. В качестве примера на рис. 1—5 представлены регистрограммы для объекта, названного «валки скошенной травы». Сравнение регистрограмм 1, 2 и 3 снимков, сделанных за светофильтром КС-14 при разных масштабах съемки, наглядно указывает на разную различимость деталей объекта. Рассчитанные значения энтропии и объема информации возрастают с увеличением масштаба съемки. Так, для масштаба 1 : 8000 за светофильтром КС-14 энтропия  $H$  равна 3.29, а объем информации 1.55; для масштаба 1 : 4000  $H=4.47$ ,  $I=2.73$ ; для масштаба 1 : 2000  $H=4.68$ ,  $I=2.94$ .

Сравнение регистрограмм 3, 4 и 5 для одного масштаба 1 : 2000, но при разных светофильтрах, также указывает на разную различимость деталей, и рассчитанные для этих случаев величины энтропии и объема информации также различны, увеличиваясь от желтого светофильтра к красному.

Для остальных объектов такой отчетливой закономерности не наблюдается. Мы приписываем эти отклонения тому, что нами при вычислениях использовалось одно и то же значение  $H_2$ .

Приводим таблицу рассчитанных значений энтропии и объема информации для разных объектов.

Название объекта	Свето-фильтры	Масштабы					
		1 : 8000		1 : 4000		1 : 2000	
		$H$	$I$	$H$	$I$	$H$	$I$
Валки скошенной травы.	ЖС18	3.33	1.59	3.85	2.11	3.78	2.04
	ОС12	3.90	2.16	4.24	2.50	3.95	2.21
	КС14	3.29	1.55	4.47	2.73	4.68	2.94
Луг.	ЖС18	2.83	1.09	—	—	3.05	1.31
	ОС12	3.16	1.42	2.51	0.77	3.56	1.82
	КС14	2.91	1.17	2.56	0.82	1.93	0.19
Сад с правильными рядами деревьев.	ЖС18	2.31	0.57	—	—	—	—
	ОС12	2.23	0.49	2.67	0.93	—	—
	КС14	2.79	1.05	2.73	0.99	—	—

Иногда можно встретить указания на то, что энтропия изображения, давая меру объема информации, определяет качество изображения. Это совершенно неправильно, так как, изучая аэроснимок, мы не знаем, сколько деталей содержит снимаемый объект. В нашей лаборатории уже много лет ведется работа по изучению статистических характеристик аэроландшафта. В настоящее время мы имеем спектровизор, позволяющий с достаточной точностью получить фотометрическую характеристику линейных сечений объекта. Очевидно, что сопоставление энтропии объекта, рассчитанной из данных непосредственных измерений, с линейной энтропией негативов (или позитивов) тех же сечений объекта позволит

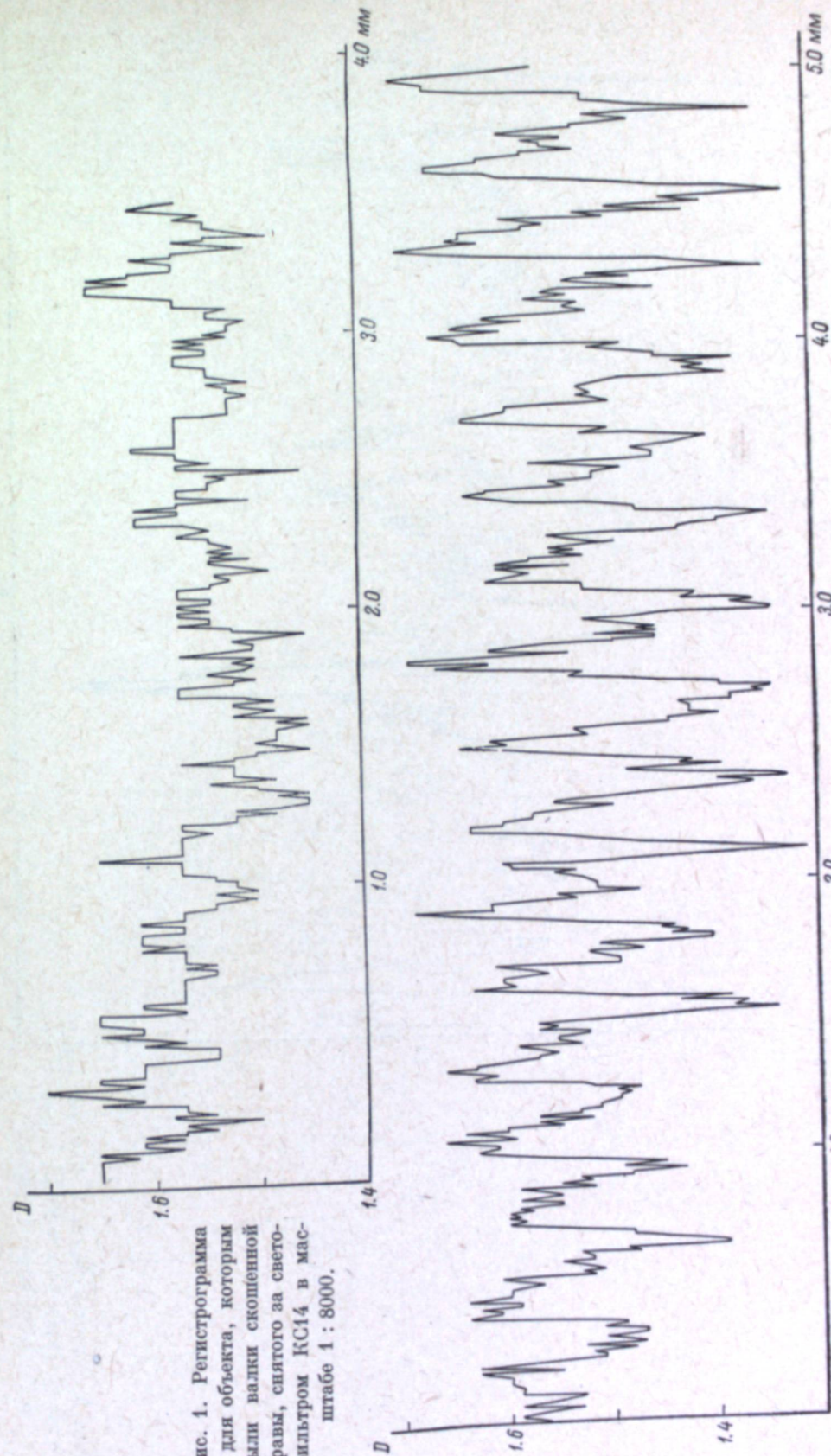


Рис. 1. Регистрограмма 1 для объекта, которым были валки скошенной травы, снятого за светофильтром КС14 в масштабе 1 : 8000.

Рис. 2. Регистрограмма 2 для того же объекта, снятого за фильтром КС-14 в масштабе 1 : 4000.

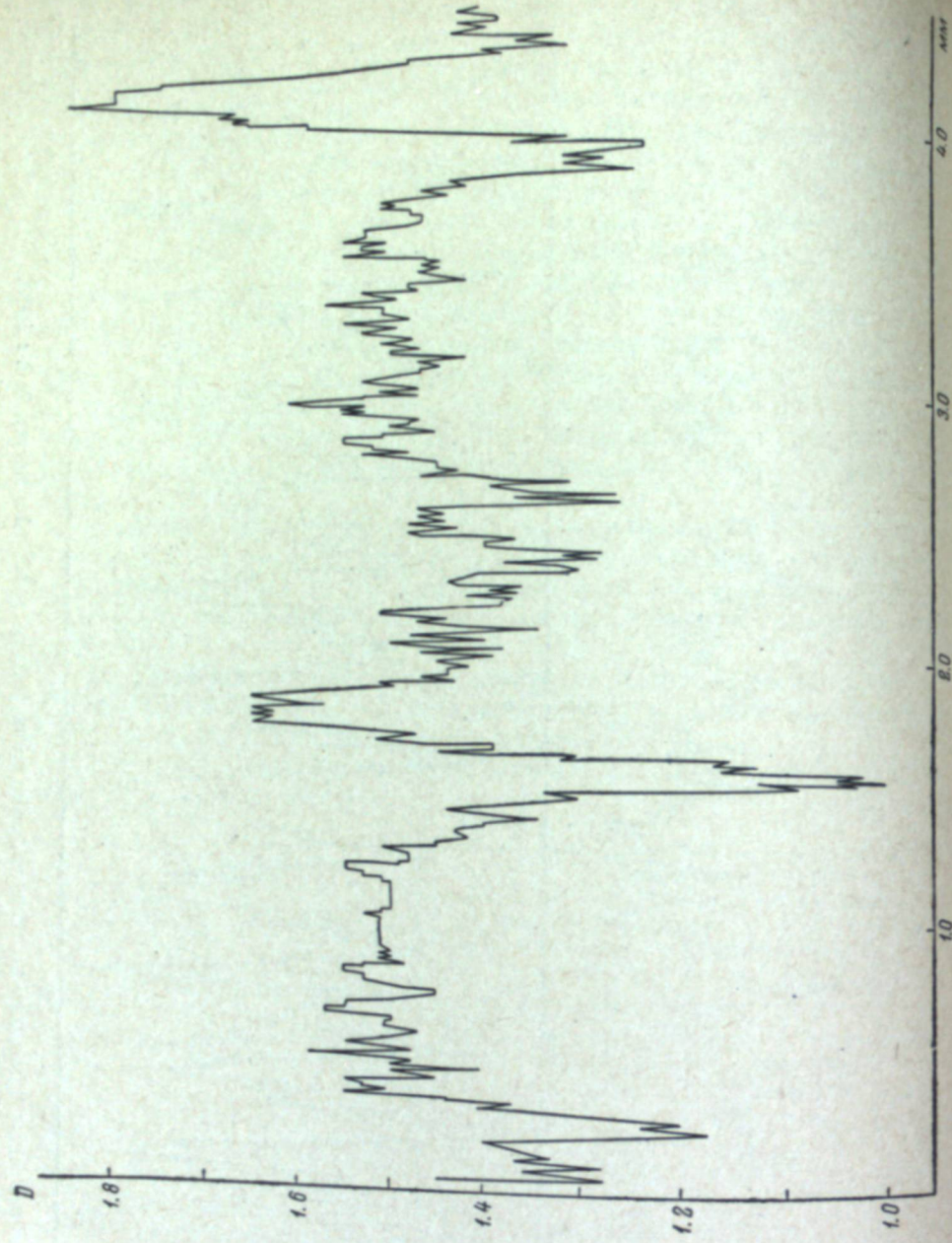


Рис. 3. Регистрограмма 3 для того же объекта, снятого за фильтром КС14 в масштабе 1 : 2000.

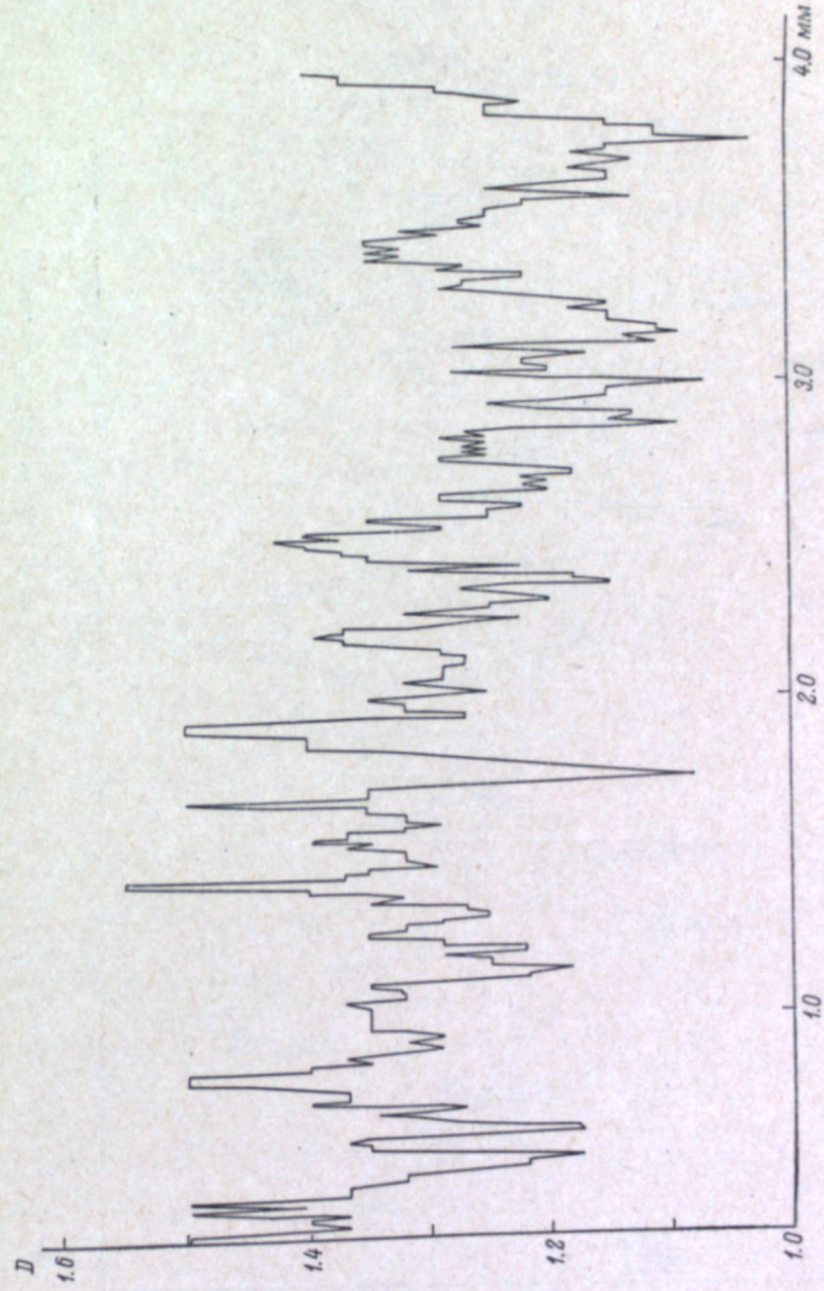


Рис. 4. Регистрограмма 4 для того же объекта, снятого за фильтром ЖС18 в масштабе 1 : 2000.

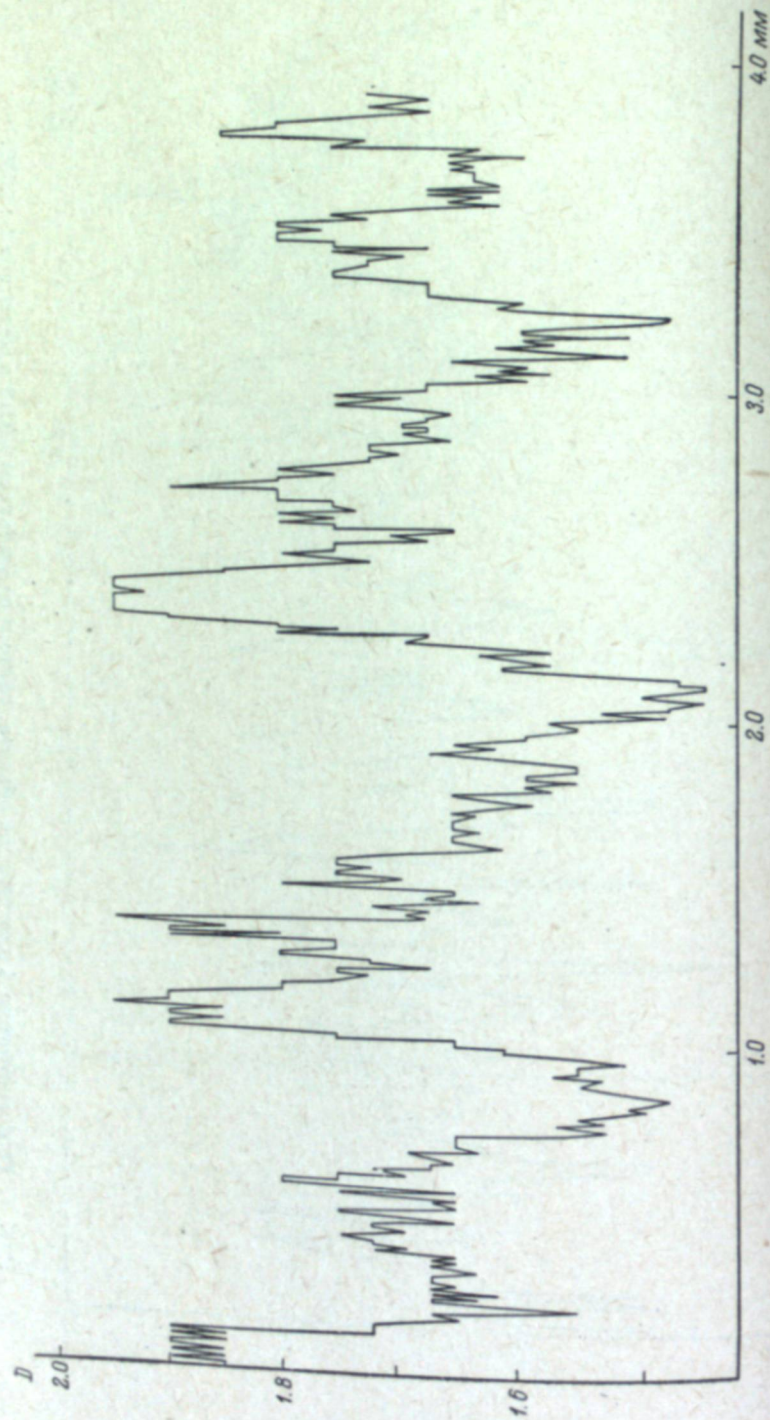


Рис. 5. Регистрограмма 5 для того же объекта, снятого за фильтром ОС12 в масштабе 1 : 2000.

определить, в какой степени передаются детали объекта изображением. Тогда качество аэроснимка  $Q$  может быть охарактеризовано отношением

$$Q = \frac{H_1 - H_2}{H_1^0 - H_2^0}, \quad (2)$$

где  $H_1^0$  — энтропия объекта, рассчитанная по экспериментальным данным;  $H_2^0$  — энтропия шума прибора, определенная в тех же условиях (на самолете), в которых проводились измерения.

#### Выводы

1. Разработан метод определения «линейной» энтропии аэрофотографического изображения, позволяющий экспериментально определять энтропию реальных аэроснимков.

2. Определена энтропия ряда аэронегативов нескольких объектов при различных условиях аэросъемки.

В ряде случаев величина объема информации, определенного по «линейной» энтропии, хорошо совпадает с качественной оценкой аэроснимков.

3. Методика определения «линейной» энтропии может быть использована для оценки объема информации аэроснимка.

Авторы выражают благодарность А. Я. Смирнову, любезно предоставившему материалы аэросъемки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. H. Linfoot, J. Phot. Sci., 7, 379, 1959.
2. P. B. Fellgett, E. H. Linfoot, Phil. Trans. Roy. Soc. (A), 247, 369, 1955.
3. R. V. L. Hartley, Bell Syst. Techn. J., 7, 3, 1928.
4. C. E. Shannon, Bell Syst. Techn. J., 27, 379, 1948.
5. E. L. O'Neill, JOSA, 48, 945, 1958.



В. Я. МИХАЙЛОВ

## СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЧЕРНО-БЕЛЫХ И ЦВЕТНЫХ АЭРОНЕГАТИВОВ

### Введение

В опубликованном ранее сообщении [1] приводились сенситометрические характеристики негативов, оптимальных с точки зрения аэрогеодезического производства. Величины, характеризующие качество аэронегативов, были получены путем статистической обработки большого количества аэрофильмов; при этом сенситометрическая оценка сопоставлялась с визуальной. Структура полученных изображений не исследовалась. Позднее Г. А. Истомина [2] провел работу по выявлению воспроизведения мелких и крупных малоcontrastных деталей фотографическими слоями, из которой следовало, что рекомендуемые для оценки аэронегативов характеристики в основном согласуются с результатами его исследования. Далее автором данной статьи в связи с разработкой критериев для оценки цветных аэронегативов было проведено сопоставление некоторых структурных характеристик черно-белых и цветных изображений [3]. Ю. К. Вифанский и Ю. Н. Гороховский опубликовали ряд сообщений [4, 5] о способности фотографических материалов к воспроизведению малых элементов оптического изображения. Кроме того, было напечатано несколько работ, посвященных исследованию влияния рассеянного эмульсионным слоем света на резкость изображения [6—8]. С учетом опубликованных сообщений в настоящее время имеется возможность сопоставить рекомендованные сенситометрические характеристики с выводами, сделанными разными авторами, о связи между структурой полученного изображения и его изобразительными свойствами. В данной статье содержится не только результат такого сопоставления, но также характеристики реальных фильмов, полученных в полевых партиях.

### Черно-белые негативы

Весьма важным свойством негатива является его градационная характеристика, определяемая в значительной степени величиной коэффициента контрастности  $\gamma$ .

В зависимости от характера ландшафта рекомендуются следующие значения  $\gamma$ :

Высокогорный район при наличии снега или без него, но с большими и глубокими тенями	0.9—1.2
Городская съемка	0.9—1.2
Лесной район	1.3—1.7
Равнинный район с хорошо выраженной ситуацией	1.2—1.5
Равнинный район со слабо выраженными контурами	1.5—1.8

В основном величина  $\gamma$  производственных негативов лежит в пределах 0.9—1.5. Как показано в работе Ю. Н. Гороховского и Т. М. Левенберг [9], с увеличением  $\gamma$  возрастает зернистость изображения; но по нашим наблюдениям, изменение  $\gamma$  для пленки Панхром X от 1.0 до 1.4 заметно зернистость не увеличивает.

В отношении изменения разрешающей способности в связи с изменением  $\gamma$  у разных исследователей выводы расходятся в довольно широких пределах. Самые ранние указания сделаны Ф. Л. Бурмистровым, показавшим, что наибольшая разрешающая способность наблюдается при  $\gamma$  порядка 1.0—1.2. Перрен и Альтман [10] по той же причине рекомендуют для высокочувствительного материала  $\gamma=0.75$ , а для позитивного 1.5. В исследованиях Г. А. Истомина [2] величина оптимальной  $\gamma$  для наибольшей разрешающей способности не приводится, но указывается, что

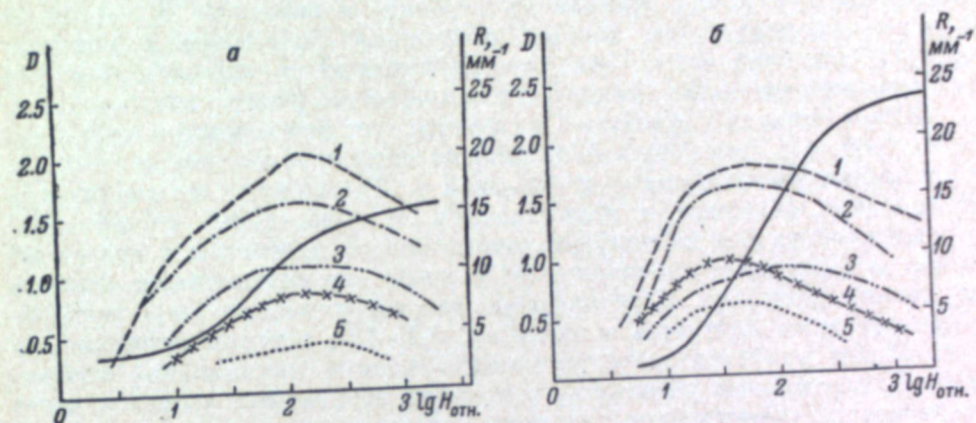


Рис. 1. Связь между разрешающей способностью и оптической плотностью для тест-объектов различного контраста ( $\Delta D$ ).

а — цветная негативная пленка; б — пленка Панхром X. 1 —  $\Delta D=0.97$ ; 2 —  $\Delta D=0.53$ ; 3 —  $\Delta D=0.21$ ; 4 —  $\Delta D=0.09$ ; 5 —  $\Delta D=0.05$ .

с увеличением  $\gamma$  абсолютная величина разрешающей способности повышается, однако при этом уменьшается интервал полезных экспозиций, в котором могут передаваться малоcontrastные объекты. По данным Ю. К. Вифанского и Ю. Н. Гороховского [4], для тест-объектов разного контраста выделяющая и разрешающая способности мало меняются в пределах  $\gamma$  от 0.70 до 1.5.

Исходя из перечисленных исследований, надо полагать, что рекомендованный коэффициент контрастности производственных негативов от 0.9 до 1.5 находится в оптимальных границах. В начальный период развития аэросъемки, учитывая, что интервал плотностей соседних деталей находится в прямой зависимости от  $\gamma$ , с целью увеличения этого различия стремились повышать  $\gamma$ ; однако при изучении таких негативов была установлена потеря некоторых деталей на плотных участках негатива, что подтверждает целесообразность указанного нами интервала изменения  $\gamma$ .

Другой весьма важной характеристикой аэронегатива является его средняя плотность, которая определяется плотностями отдельных участков. Эта величина важна с двух точек зрения. Во-первых, производственно нежелательно иметь очень плотный негатив, так как это создает дополнительные затруднения при его использовании. Во-вторых, о влиянии плотностей на разрешающую способность и передачу деталей имеются более конкретные сведения, чем в отношении  $\gamma$ . В наших ранних работах [1] было показано, что подавляющее большинство аэронегативов хорошего качества имеет среднюю плотность в пределах 0.7—1.0; для нега-

тивов другого назначения допускаются колебания плотности от 0.4 до 2.4. В упоминавшейся работе Г. А. Истомина [2] показано, что наилучшая дешифрируемость деталей и наибольшая разрешающая способность находятся примерно в пределах плотности 0.5—1.5.

Изменение разрешающей способности в зависимости от плотности негативов и  $\Delta D$  тест-объекта приводятся в нашей работе [3], где было показано, что независимо от контраста тест-объекта максимумы кривых  $R = f(\lg H)$  лежат около плотности 1.0 (рис. 1). Величина оптической плотности негатива зависит от экспозиции и времени проявления, т. е. от  $\gamma$ . Для резольвограмм автором же [11] еще ранее было показано, что независимо от состава проявителя, времени проявления и экспозиции наибольшая величина разрешающей способности находится при оптимальной плотности, которая может быть получена различно — в случае большой экспозиции при малом времени проявления, и наоборот. Примерно об этом же свидетельствуют данные, полученные Вифанским и Гороховским [4]. Они приводят график, характеризующий зависимость выделяющей и разрешающей способностей для тест-объектов разного контраста от  $\gamma$ .

Во всех случаях наименьшей  $\gamma$  соответствует наибольшая экспозиция, и наоборот, т. е. при большой экспозиции проявлять следует до малой  $\gamma$ , а при малых экспозициях — до большой  $\gamma$ . Практически это значит, что оптимальная величина и разрешающей, и выделяющей способностей должна приходиться на какую-то определенную плотность; в названной работе в подавляющем большинстве случаев она соответствует единице или лежит около нее. Первоначально для аэронегативов была рекомендована средняя плотность в пределах 0.7—1.0, которая определялась как среднее арифметическое из максимальной и минимальной плотностей. В дальнейшем убедились, что выбор измеряемых участков часто производится произвольно, поэтому предложено определять общую (интегральную) плотность для всего негатива в целом; это вносит определенность в измерения. Для общей плотности рекомендована примерно та же величина 0.7—1.1. Негативы с общей плотностью более 1.6 использовать не рекомендуется. На отдельных негативах, как исключение, могут быть детали, имеющие плотность до 2.0. Весьма важно, чтобы минимальная плотность заметно отличалась от вуали. Различие между средней и общей плотностями представлено на рис. 2; оно характеризуется разбросом точек по отношению к наклонной прямой.

Количество аэрофильмов, характеризующихся заданными значениями коэффициента контрастности, общей (интегральной), минимальной и максимальной плотностей

Интервал значений $\gamma$	Количество фильмов	Интервал значений $D_{\text{интегр.}}$	Количество фильмов	Интервал значений $D_{\text{min}}$	Количество фильмов	Интервал значений $D_{\text{max}}$	Количество фильмов
< 0.9	2	< 0.7	2	< 0.2	2	< 1.0	3
0.9—1.0	9	0.9—1.1	73	0.2—0.4	36	1.0—1.4	45
1.01—1.1	17	> 1.1	16	> 0.4	53	1.4—1.6	23
1.11—1.2	13	—	—	—	—	> 1.6	20
1.21—1.3	13	—	—	—	—	—	—
1.31—1.4	12	—	—	—	—	—	—
1.41—1.5	8	—	—	—	—	—	—
1.51—1.6	6	—	—	—	—	—	—
1.61—1.7	5	—	—	—	—	—	—
> 1.7	6	—	—	—	—	—	—
Всего . . .	91	—	91	—	91	—	91

Из всего сказанного следует, что рекомендуемая нами величина плотности аэронегативов также находится в оптимальных границах с точки зрения передачи мелких и малоконтрастных деталей.

В летносьемочный сезон 1961 г. был поставлен опыт сенситометрической оценки реальных фильмов, получаемых в полевых условиях. Для контроля было изготовлено 4 комплекта полевых сенситометрических приборов, разработанных и описанных А. Н. Успенским [12]. В фильм перед проявлением в 3 местах впечатывался оптический клин, соответ-

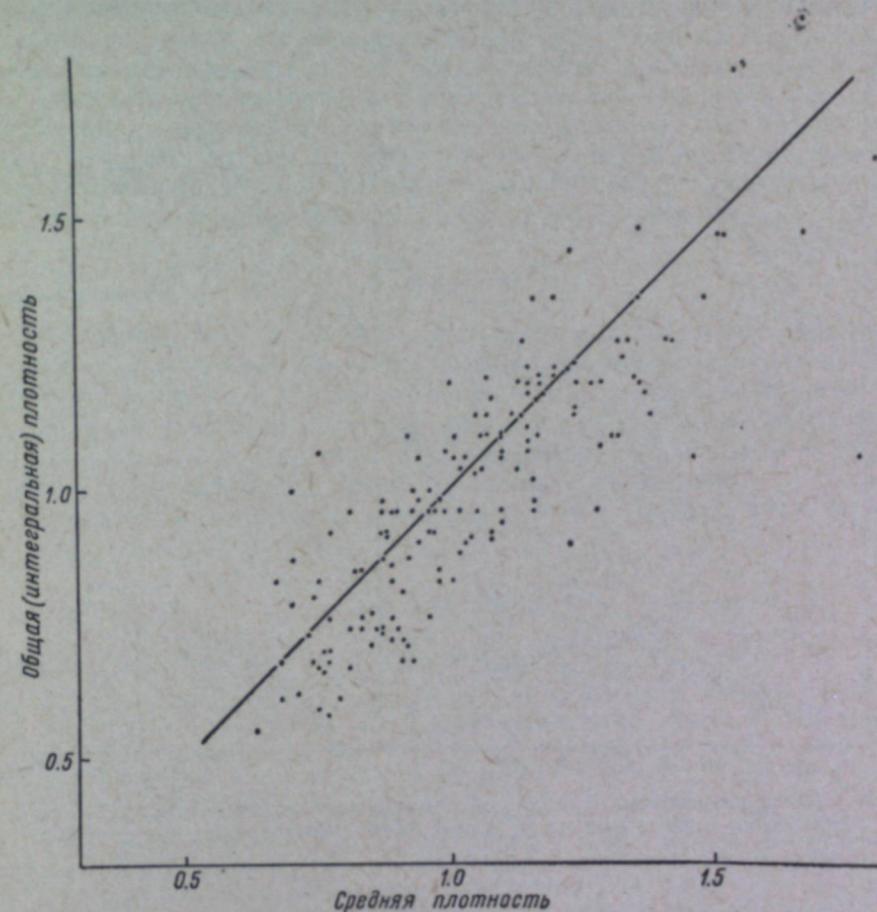


Рис. 2. Различие в величинах средней и общей (интегральной) плотностей аэронегативов.

ствующий тому, который находится в сенситометре ФСР-4; измерения полей клина проводились на полуавтоматическом денситометре; общая (интегральная) плотность определялась на цельнокадровом денситометре. Опыт был поставлен в 3 полевых партиях. Полученные результаты приведены в таблице.

Из приведенных данных следует, что для подавляющего количества фильмов сенситометрические характеристики соответствуют рекомендованным; на таких негативах должны хорошо передаваться детали.

#### Цветные негативы

Если в отношении оценки черно-белых фильмов накоплен достаточный опыт и подтверждено, что рекомендуемые характеристики обеспечивают наилучшую передачу деталей, то в отношении цветных фильмов такого опыта нет. Прежде чем наметить характеристики для цветных фильмов,

потребовалось провести предварительную работу по сопоставлению некоторых свойств черно-белых и цветных изображений [3].

Были сопоставлены сенситометрические характеристики для тест-объектов разного контраста (рис. 3); оказалось, что максимум разрешающей способности также приходится на область, лежащую около плотности 1.0. Изменение разрешающей способности в зависимости от  $\Delta D$  тест-объекта аналогично. Изменения резкости изображения для различных плотностей также очень близки. Все это позволило провести аналогию между черно-белыми и цветными негативами. Было исследовано большое число производственных

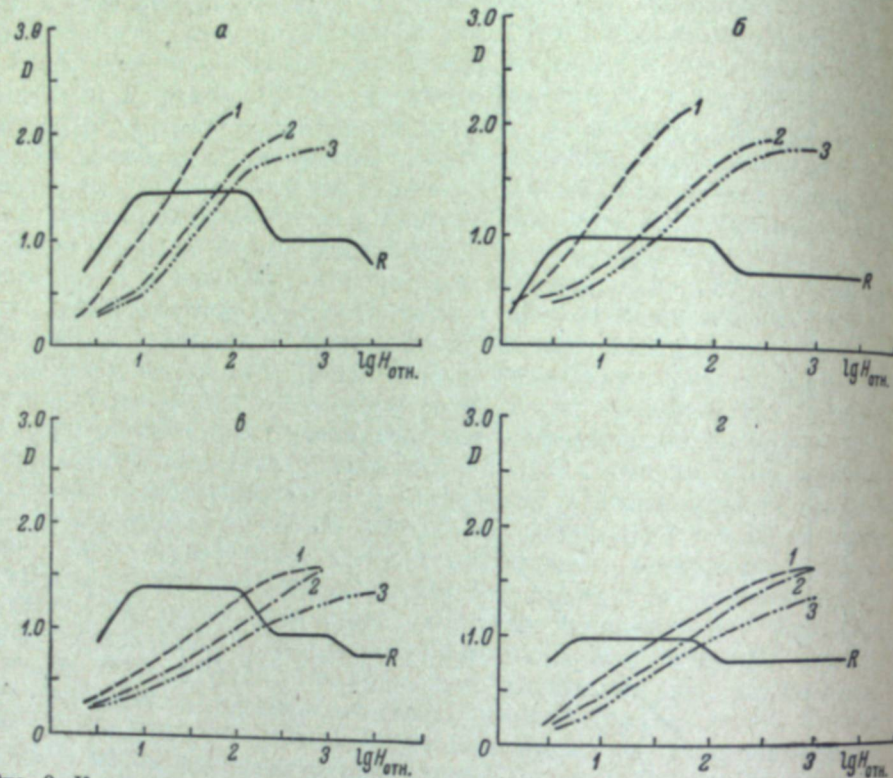


Рис. 3. Кривые разрешения  $R$  для тест-объектов разного контраста ( $\Delta D$ ) и характеристические кривые отдельных слоев цветной негативной пленки ЦН-1. а, б —  $\Delta D = 0.46$ , в, г —  $\Delta D = 0.16$ ; а, б —  $t_{пр.} = 8$  мин., в, г —  $t_{пр.} = 6$  мин. Слои: 1 — голубой; 2 — желтый; 3 — пурпурный.

и экспериментальных фильмов (цветных и спектральных). Производилось не только сенситометрическое исследование, но также и печать. Сенситометрические характеристики сопоставлялись только для тех негативов, с которых получались отпечатки хорошего качества. Так как, по предварительным исследованиям, структурные характеристики цветных изображений близки к черно-белым, то можно допустить, что передача деталей на них также будет оптимальной. В дальнейшем это еще будет проверяться экспериментально. Рекомендуются следующие величины  $\gamma$  для различных районов:

Районы	Рекомендуемая величина $\gamma$ для фильмов	
	цветных	спектральных
Высокогорный, имеющий глубокие тени, занимающие большую площадь . . . . .	0.9—1.2	1.2—1.8
Лесной . . . . .	1.4—1.8	1.5—2.2
Равнинный с хорошо выраженной ситуацией . . . . .	1.2—1.6	1.5—2.2
Равнинный со слабо выраженной ситуацией . . . . .	1.4—1.8	1.8—2.4

Несмотря на то что эти характеристики выводились независимо от результатов, полученных при исследовании черно-белых фильмов, легко заметить хорошее совпадение значений  $\gamma$  для этих последних и для цветных фильмов. Для спектральных же фильмов рекомендуется значительно большая величина  $\gamma$ . Предположительно это объясняется тем, что спектральное изображение должно иметь преувеличенные цветовые контрасты для лучшего опознавания дешифрируемых объектов. Для цветной пленки цветовые контрасты очень увеличивать нельзя, так как при этом может сильно нарушиться точность цветовоспроизведения. В настоящее время применяется преимущественно спектральная пленка; цветная пленка ЦН-1 не удовлетворяет требованиям аэро съемки ни по светочувствительности, ни по коэффициенту контрастности. Общая (интегральная) плотность негативов, определяемая при белом свете, должна находиться в тех же пределах, что и для черно-белых фильмов. Приведенные здесь характеристики цветных и спектральных пленок пока еще в производственных условиях не проверялись.

### Выводы

1. Приведены сенситометрические характеристики, позволяющие объективно оценивать черно-белые и цветные аэрофильмы.
2. Путем сопоставления рекомендованных характеристик с литературными данными о влиянии условий обработки на структуру изображения показано, что рекомендованные характеристики обеспечивают получение негативов с оптимальными изобразительными свойствами.
3. Приведены результаты проверки рекомендованных характеристик в производственных условиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Михайлов, Усп. научн. фотогр. IV, 61, 1955.
2. Г. А. Истоин, Тр. ЦНИИГАиК, вып. 107, 139, 1955.
3. В. Я. Михайлов, Тр. ЦНИИГАиК, вып. 141, 173, 1961.
4. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 276, 1959.
5. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 5, 15, 1960.
6. Г. А. Истоин, Техника кино и телевид., 5, вып. 2, 1, 1961.
7. П. Х. Прусс, В. И. Максина, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 259, 1959.
8. П. Х. Прусс, Изв. АН СССР, сер. физ., 21, 1526, 1957.
9. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. фотогр., I, 86, 1951.
10. F. N. Perrin, J. Altman, JOSA, 42, 455, 1952.
11. В. Я. Михайлов, Тр. ЦНИИГАиК, вып. 82, 47, 1951.
12. А. Н. Успенский, Тр. ЦНИИГАиК, вып. 142, 199, 1961.

Е. А. БУКАТИН  
ОПТИКА ПРОЯВЛЕННОГО ДИАИЗОБРАЖЕНИЯ.  
ЛИНЗОВЫЙ ЭФФЕКТ

Постановка вопроса

Основной формой фотографического изображения в настоящее время является диаизображение — изображение на прозрачной подложке, получаемое с помощью галогосеребряных желатиновых слоев.

Диаизображение является модулятором света для локального ослабления однородного светового потока. При контактной печати ослабление происходит в непосредственной близости от вторичного светочувствительного слоя; в случае проекции, являющейся наиболее распространенной формой использования диаизображения, ослабление осуществляется в кадровом окне проектора, фотоувеличителя или читального аппарата.

Обычно процесс ослабления света диаизображением объясняют поглощением и рассеянием света веществом изображения, причем последнее играет подчиненную роль. В то же время совершенно игнорируется роль желатинового слоя эмульсии. Ближайшее рассмотрение показывает, что такое представление справедливо лишь в первом приближении и что действительный механизм ослабления света проявленным фотографическим изображением значительно сложнее.

Схематически фактическая оптическая плотность диаизображения  $D_{\Sigma}$  может быть представлена как сумма оптических плотностей, обусловленных действительным поглощением света  $D_{\Phi}$ , рассеянием света веществом изображения  $D_{\rho}$ , рассеянием света на поверхности изображения  $D_{\Sigma}$  и закономерным отклонением света криволинейными элементами поверхности обработанного эмульсионного слоя  $D_{\Delta}$ .

$$D_{\Sigma} = D_{\Phi} + D_{\rho} + D_{\Sigma} + D_{\Delta}.$$

При изучении механизма ослабления света диаизображением основное внимание уделялось первым двум членам этого выражения.

При рассмотрении оптических свойств проявленного диаизображения роль желатинового слоя можно пренебречь лишь в том случае, если поверхность эмульсионного слоя представляет собой более или менее идеальную плоскость. Однако в процессе химико-фотографической обработки слой обычно приобретает заметный рельеф, особенно сильно выраженный при использовании дубящих проявителей и при вторичной обработке растворами, содержащими железосинеродистый калий, соли тяжелых металлов (усилители и виражи) и другие дубящие желатин соединения.

В результате образования на поверхности эмульсионного слоя криволинейных участков последний превращается в сложную оптическую систему. Направленный пучок света при прохождении через нормально обработанное диаизображение не сохраняет своего первоначального направления, а претерпевает закономерные отклонения на криволинейных элементах поверхности эмульсионного слоя.

Причины нарушения плоскостности эмульсионного слоя весьма разнообразны. Важнейшими из них являются желатиновый эффект [1, 2], утолщение эмульсионного слоя вследствие скопления вещества и уменьшение толщины слоя в результате фиксирования. Основным фактором является желатиновый эффект, обуславливающий смещение границы раздела черно-белых полей в сторону поля с большей оптической плотностью. Во многих случаях применения фотографии, при сравнительно невысоких требованиях к качеству фотографического изображения, этими явлениями можно пренебречь, в случае же более точной работы они могут быть причинами сильных помех и искажений. В связи с развитием микро-репродукции и переходом ко все более высоким степеням уменьшения, достигающим в настоящее время 60—100×, большое значение приобретает изучение вопросов точного фотосинтеза с максимальным исключением фотометрических и геометрических искажений оригинала.

Предметом настоящей работы является изучение эмульсионного слоя проявленного диаизображения как линзовой системы.

Методика определения фокусного расстояния микролинз

Наиболее удобным методом изучения оптических свойств микролинз, образующихся на поверхности эмульсионного слоя, является измерение размеров изображений, образуемых исследуемыми линзами, с помощью микроскопа. В качестве объекта может служить нить лампы накаливания С-образной формы или несимметричная мира, освещаемая направленным светом конденсора. Высокая яркость объекта необходима для того, чтобы иметь возможность изучать линзы с большими радиусами кривизны, относительно большим фокусным расстоянием и малой светосилой. Асимметричность объекта нужна для определения знака линзы по расположению изображения.

Размер изображения, образуемого линзой пластинкой, находящейся на предметном столике микроскопа, определяется с помощью винтового или сеточного окуляр-микрометра. Так как расстояние  $L$  между линзой пластинкой и светящимся телом во много раз превосходит фокусное расстояние исследуемых линз  $F$ , то изображение объекта практически лежит в плоскости главного фокуса и можно принять, что

$$\frac{L}{F} = \frac{A}{a}, \quad \text{т. е. } F = \frac{aL}{A},$$

где  $A$  — размеры объекта (тела накала лампы или миры);  $a$  — размеры его изображения, образованного исследуемой линзой.

Желатиновый эффект при урановом усилении

Для определения величины желатинового эффекта на диапозитивных пластинках при урановом усилении производилась съемка черных кружков. Получаемые на негативе прозрачные кружки имели диаметр от 0.13 до 0.74 мм. Пластинки проявлялись в метолгидрохиноновом проявителе и после промывания усиливались в урановом усилителе.

Измерение диаметра изображений кружков проводилось дважды: на мокром неусиленном негативе непосредственно после окончания промывания и на сухом негативе после усиления.

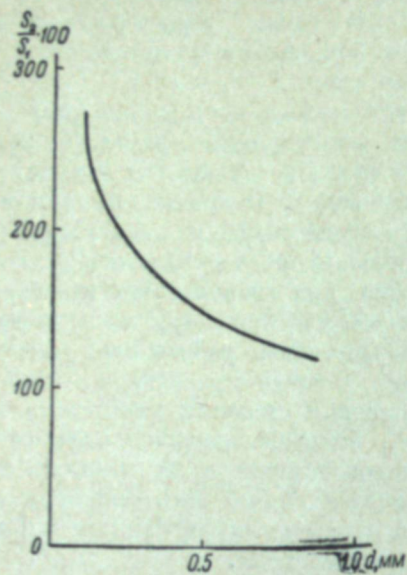


Рис. 1. Влияние желатинового эффекта на увеличение площади белых кружков на негативе. Зависимость отношения  $\frac{S_2}{S_1}$  от диаметра кружка  $d$  на влажном неусиленном негативе.

$s_1$  — площадь светлых кружков на влажном неусиленном негативе;  $s_2$  — площадь тех же кружков на сухом усиленном негативе.

ответствующему уменьшению кривизны и увеличению фокусного расстояния линзы. В определенный момент поверхность желатина на месте кружка становится плоской. В этот момент функция  $F=f(t)$  испытывает разрыв непрерывности и значение  $F$  мгновенно переходит от  $+\infty$  к  $-\infty$ . При визуальном наблюдении в этот момент ясно видимое действительное изображение предмета, лежащее выше плоскости эмульсионного слоя и непрерывно увеличивающееся по мере высыхания последнего, сопровождающегося увеличением фокусного расстояния линзы, становится волнистым, затуманивается и, наконец, снова появляется в виде ясного мнимого изображения, лежащего ниже эмульсионного слоя. На рис. 2 схематически показано изменение фокусного расстояния со временем, т. е. по мере высыхания эмульсионного слоя.

На рис. 3 показан при 70-кратном увеличении положительный линзовый эффект белого кружка или белого штриха (см. ниже). В качестве оригинала служил негатив точечного раstra. Размер белых кружков на негативе составлял 0.04 мм, расстояние между кружками 0.17 мм. На фотографии

и на сухом негативе после усиления. Результаты опыта приведены на рис. 1. Опыт показывает, что площадь прозрачных элементов  $s$  вследствие желатинового эффекта при усилении увеличивается в 1.5—2.7 раза. Под влиянием всестороннего растяжения на месте прозрачных кружков образуются чечевицеобразные углубления — отрицательные линзы с различным фокусным расстоянием, зависящим от диаметра линзы.

#### Частные случаи линзового эффекта

Линзовый эффект белого кружка. Линзовый эффект белого кружка, получаемого при съемке черного кружка оригинала, на сухом негативе отрицателен. При проявлении белый кружок набухает сильнее задубленных участков черного фона негатива. Поэтому во влажном состоянии он является положительной линзой с малым радиусом кривизны и очень коротким фокусным расстоянием. По мере высыхания негатива  $s$  (ростом времени  $t$ ) уменьшается объем набухшего желатина белого кружка, а под влиянием желатинового эффекта увеличивается площадь кружка, что приводит к со-

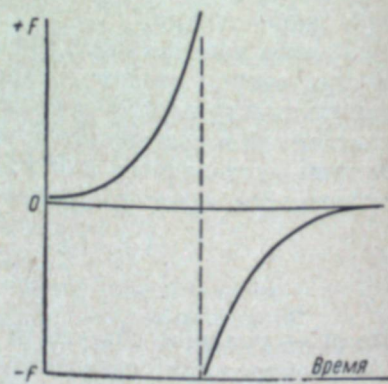


Рис. 2. Схематический ход изменения фокусного расстояния линзы, образованной белыми кружками на негативе, по мере высыхания последнего.

картины, образуемой тем же растром, после высыхания хорошо видно перевернутое по отношению к рис. 3 изображение нити лампы.

Для того чтобы подтвердить, что образование наблюдаемых в микроскоп изображений обусловлено криволинейностью поверхности, а не иными оптическими явлениями, на отрицательные линзы (белые кружки негатива) наносилась капля жидкости с тем или иным показателем пре-

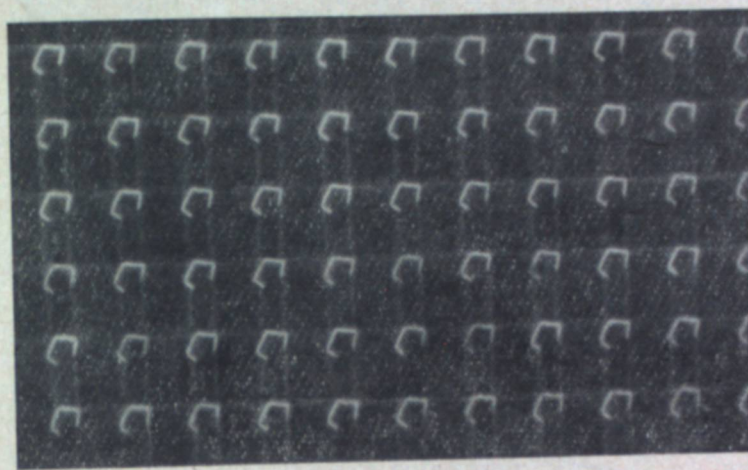


Рис. 3. Положительный линзовый эффект белых кружков влажного негатива точечного раstra; изображение нити накала лампы, образованное белыми линзами диаметром 0.04 мм. Увел. 70x.

ломления, которая накрывалась покровным стеклом, и получаемая пластинка наблюдалась под микроскопом. Результаты экспериментов приведены в таблице, которая показывает, что применением соответственно подобранной жидкости можно полностью устранить линзовый эффект.

Влияние иммерсии на линзовый эффект. Негативные белые линзы на усиленном ураном негативе раstra

Иммерсионная жидкость	Показатель преломления	Характер линзового эффекта
Анисовое масло . . . . .	1.56	Отрицательный.
Ортотолуидин . . . . .	1.57	Полное отсутствие.
Анилин . . . . .	1.60	Слабый положительный.
Йодбензол . . . . .	1.62	Положительный.
$\alpha$ -бромнафталин . . . . .	1.66	Положительный.

Линзовый эффект белого штриха. Белый штрих (полоса) на черном фоне негатива образует отрицательную цилиндрическую линзу, фокусное расстояние которой меняется так же, как и в случае белого кружка. На рис. 4 приведена зависимость фокусных расстояний цилиндрических линз  $F$  от ширины штрихов  $d$ , полученная в одной серии опытов и дающая представление о порядке величин, с которыми приходится иметь дело при исследовании линзового эффекта. Из рис. 4 видно, что, начиная с некоторого значения ширины, фокусное расстояние становится линейной функцией последней. Подобный ход кривой может быть объяснен тем, что при тонких штрихах сечение представляет сфери-

ческую линзу, а при увеличении ширины происходит уплощение дна штриха, по краям которого размещаются две призмы. Призмы вызывают постоянное отклонение лучей, точка пересечения которых перемещается пропорционально расстоянию между призмами. Данные этой серии

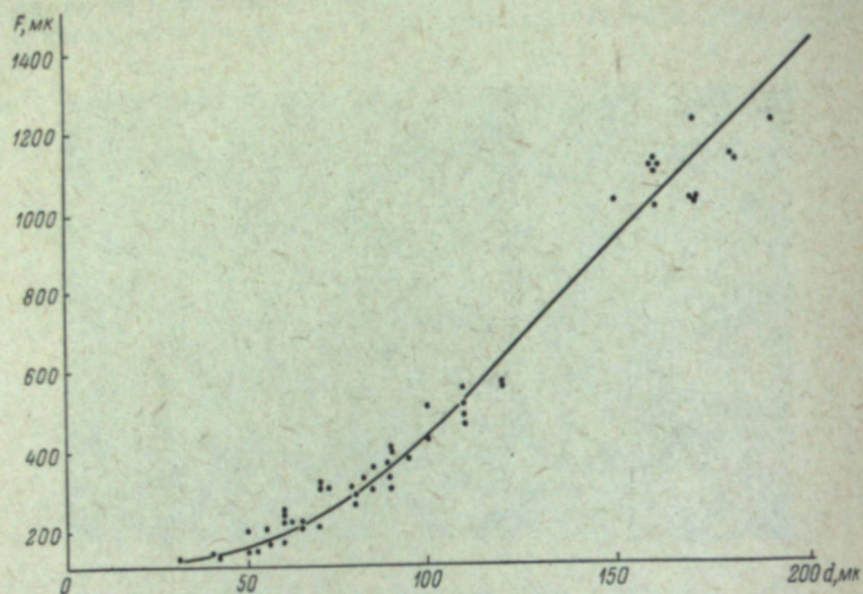


Рис. 4. Зависимость фокусного расстояния  $F$  цилиндрических линз (белых штрихов негатива, усиленного ураном) от ширины штриха  $d$  неусиленного негатива.

опытов показывают лишь порядок величины, так как фокусное расстояние образующихся линз зависит от многих факторов: сорта фотографического материала, топографии серебряного изображения, рецептуры и режима химико-фотографической обработки и т. п.

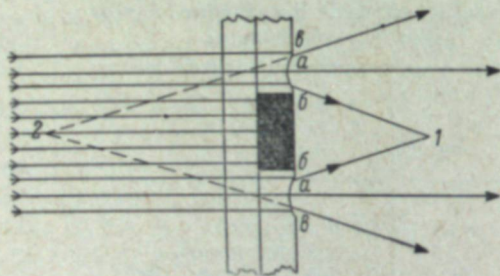


Рис. 5. Приблизительная схема образования комбинированной кольцевой линзы вокруг черного кружка. Кружок образует одновременно и действительное (1), и мнимое (2) изображения.

ребром изображения линза является кольцевой. По мере высыхания желатинового слоя под влиянием вышеописанных процессов происходит уменьшение размеров черного кружка и образование кольцевой канавки вокруг последнего. Профиль сечения точки принимает вид, приведенный на рис. 5. При этом образуется сложная комбинированная кольцевая линза, каждая зона которой имеет собственное фокусное расстояние. Линза, образованная черным кружком на сухом негативе, является отрицательно-положительной; зоны ее, лежащие между точками  $a$  и  $b$ , образуют положи-

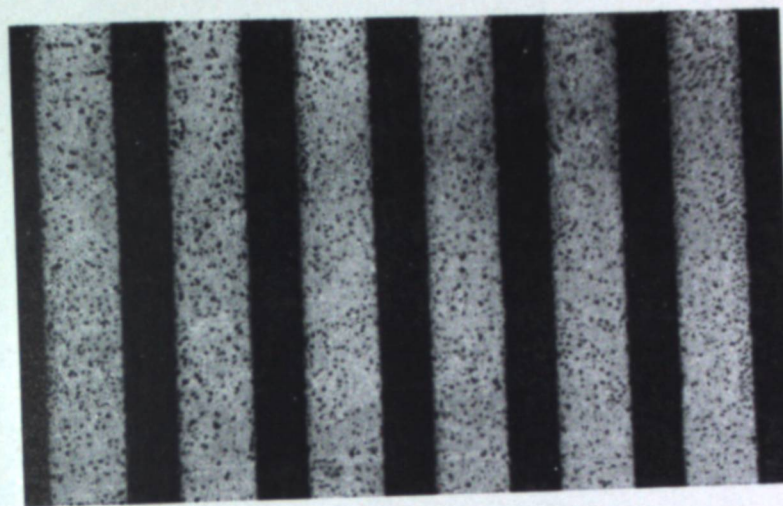


Рис. 6. Микрофотография линейного раstra при фокусировании на эмульсионный слой при диффузном освещении (молочное стекло). Первое резкое изображение. Увел.  $70\times$ .

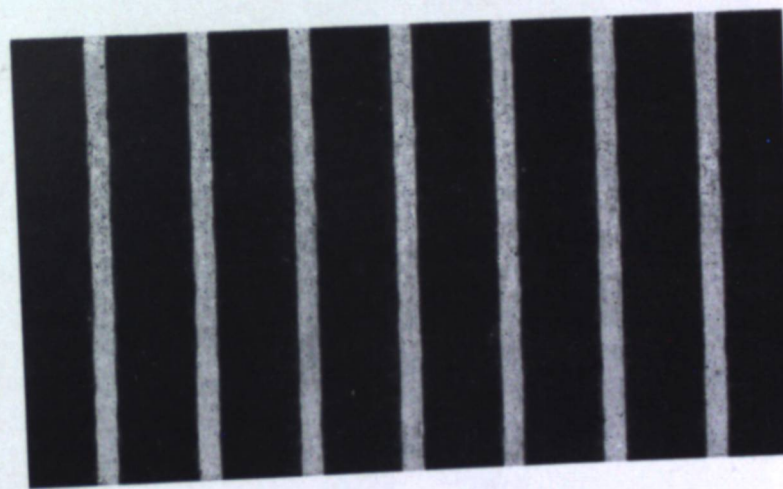


Рис. 7. Микрофотография того же негатива, что и на рис. 6, при фокусировании на действительное изображение источника света, образованное цилиндрическими линзами раstra и лежащее выше плоскости эмульсионного слоя: линзовый эффект черного штриха. Второе резкое изображение. Увел.  $70\times$ .

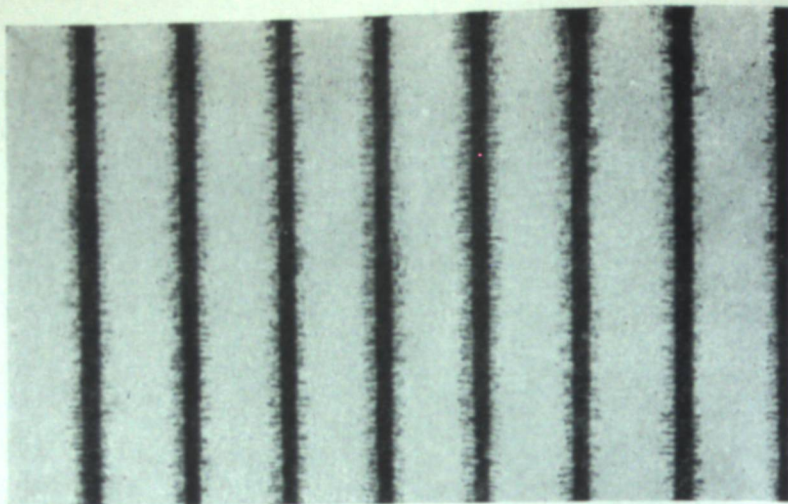


Рис. 8. Микрофотография того же участка негатива, что и на рис. 6 и 7, при фокусировании на мнимое изображение источника света, образованное цилиндрическими линзами раstra и лежащее ниже эмульсионного слоя: линзовый эффект белого штриха. Третье резкое изображение. Увел. 70 $\times$ .

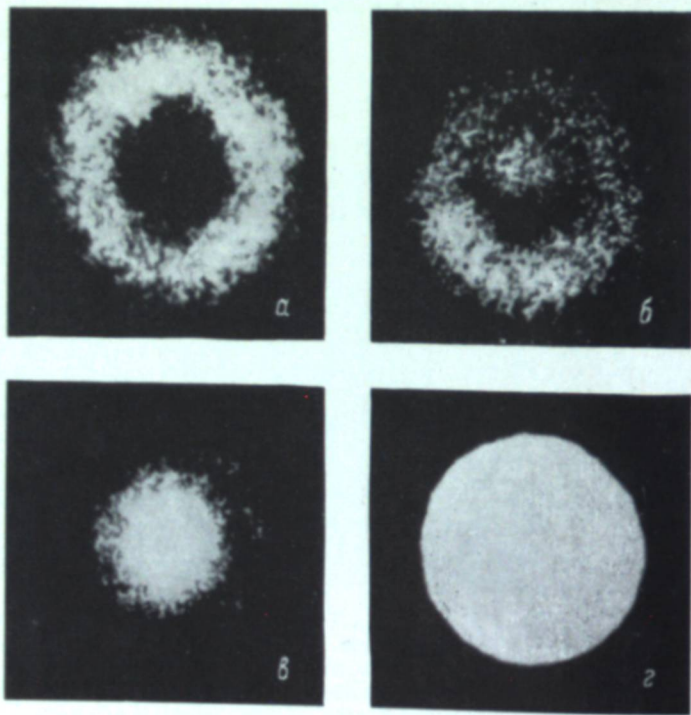


Рис. 11. Проявление линзового эффекта при контактной печати черных кружков.

а — черные кружки в центре светлого диска, получающиеся при фокусном расстоянии кольцевой линзы черного кружка негатива, равном удвоенной толщине фотопластины; б — черные кольца в центре светлого диска при фокусном расстоянии кольцевых линз черного кружка, несколько большем или меньшем удвоенной толщины пластины; в — черные кольца большого диаметра, проходящие по краям светлого диска, получающиеся при фокусном расстоянии кольцевой линзы черного кружка, значительно отличающемся от удвоенной толщины пластины; г — копии тех же кружков, полученные контактной печатью на позитиве; з — копии тех же кружков, полученные контактной печатью с применением иммерсии; проявления линзового эффекта полностью устранены и вместе с тем устранены и фотометрические или геометрические искажения копии, обусловленные ими.

тельные кольцевые линзы. Фокусное расстояние зон увеличивается от  $b$  к  $a$ , где оно имеет значение  $\infty$ . От  $a$  до  $b$  лежат зоны отрицательных линз, фокусное расстояние которых уменьшается от точки  $a$  до минимального значения в зоне  $b$ . Такая линза изображает светящуюся монохроматическую точку в виде двух прямых линий, лежащих по обе стороны эмульсионного слоя. Светящийся кружок конечного размера изображается такой линзой в виде двух конусов, разделенных некоторым промежутком и обращенных вершинами друг к другу. Оба конуса, как в области действительных изображений, так и в области мнимых изображений, распространяются до  $\pm \infty$ .

**Линзовый эффект черного штриха.** Линзовый эффект черного штриха аналогичен эффекту черного кружка с тем отличием, что образуются не сферические, а цилиндрические линзы.

На рис. 6 дано изображение раstra, наблюдаемое в микроскоп при точном фокусировании на эмульсионную плоскость. На рис. 7 приведена та же микрофотография при фокусировке на действительное изображение источника света, образованное положительными цилиндрическими линзами (линзовый эффект черного штриха) и лежащее выше эмульсионного слоя. На рис. 8 показан тот же участок раstra, что и на рис. 6 и 7, но при фокусировке на мнимое изображение источника света, образованное светлыми штрихами и лежащее ниже плоскости эмульсионного слоя (линзовый эффект светлого штриха).

#### О роли линзового эффекта при контактной печати

Большая оптическая сила образующихся линзовых элементов должна приводить к значительному отклонению направленных световых лучей

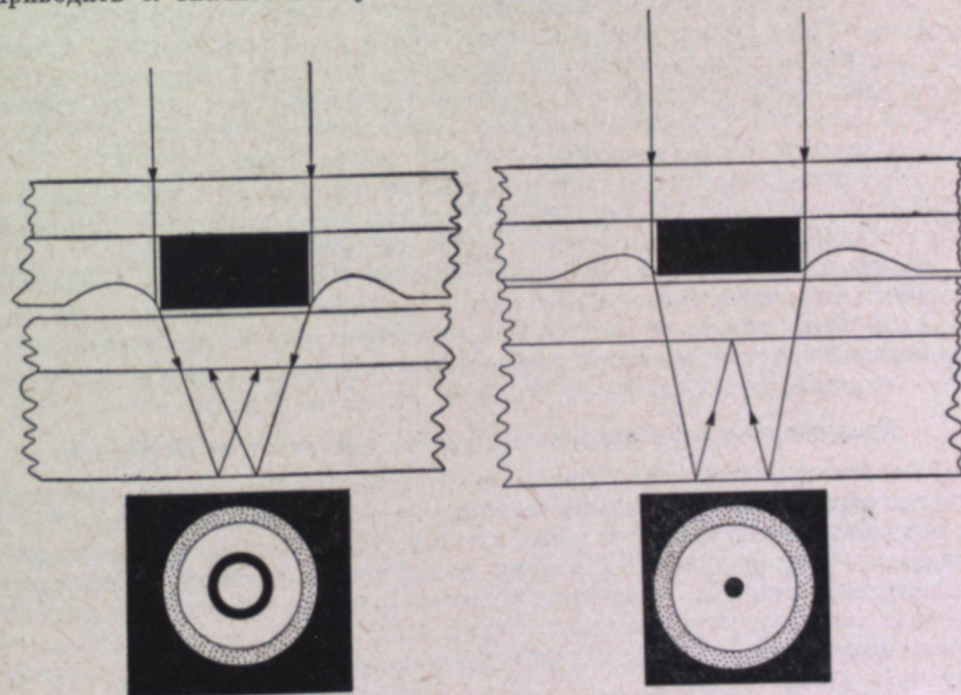


Рис. 9. Примерная схема образования черного кольца внутри светлого кружка при контактном копировании черных кружков (общий случай).

Рис. 10. Примерная схема образования черного кружка в центре светлого диска при контактном копировании черных кружков (частный случай, когда фокусное расстояние кольцевой линзы равно удвоенной толщине пленки или пластины).

в фотоувеличителе и вызывать геометрические и фотометрические искажения при печати.

Рассмотрение хода лучей в позитивном слое после отклонения их кольцевыми линзами или призмами, окаймляющими черные элементы и вообще границы участков со значительными перепадами почернений, показывает, что на позитивном светочувствительном слое должно образовываться почернение под черными элементами копируемого негатива, вызываемое следующими тремя причинами.

1. В результате отклонения света кольцевой или цилиндрической линзой к центру черного кружка или штриха световой поток проникает под края черного элемента негатива, вследствие чего должно иметь место смещение черно-белой границы в сторону светлого поля позитива и уменьшение размеров светлых кружков и штрихов на вторичном (позитивном) изображении.

2. Положительная кольцевая линза вокруг черного кружка негатива или цилиндрическая линза около черного штриха должна образовывать изображение источника света. В общем случае лучи от точечного источника света, отклоненные кольцевой линзой и отраженные от поверхности основы, не имеющей противоореального слоя, должны образовывать светлое кольцо, расположенное в зависимости от фокусного расстояния кольцевой линзы либо под черным кружком копируемого изображения, либо за пределами его границы. Аналогичное явление должно наблюдаться и при копировании черных штрихов; в этом случае на эмульсионном слое должны образовываться два параллельных штриха, лежащих либо под первичным черным копируемым штрихом, либо за пределами его границ. Схема образования кольцевого изображения источника света дана на рис. 9.

3. В частном случае, когда фокусное расстояние образовавшейся кольцевой или цилиндрической линзы равно удвоенной толщине основы, на позитивном эмульсионном слое должно образоваться изображение источника света. В этом случае при точечном источнике света на позитиве в центре светлого кружка должен образоваться черный кружок, а в середине светлого штриха позитива — черный штрих (рис. 10).

Эти оптические эффекты должны в той или иной степени маскироваться диффузным ореолом. С уменьшением ореольности вторичного светочувствительного слоя роль линзовых эффектов должна возрасти.

Если предполагаемое явление образования потемнения под черными элементами копируемого изображения действительно имеет место, оно должно быть одним из источников геометрических и фотометрических искажений фотографического изображения при контактной и проекционной печати.

#### Исследование роли линзового эффекта при контактной печати

На ортохроматической пластинке Кодалит был изготовлен точечный растр, образованный круглыми черными кружками диаметром 25—30 мк с большой плотностью и резкими краями. Растровое изображение проявлялось в проявителе D-85. Полученный точечный растр копировался контактным путем на пластинку Кодалит при свете ртутной «точечной» лампы сверхвысокого давления Осрам НВО 107/36 с телом свечения диаметром около 0.15 мм, находившейся на расстоянии 1 м от экспонируемого растра.

С прозрачных кружков копии готовились микрофотографии (рис. 11), из которых видно, что в светлых кружках действительно имеются черные кружки и черные кольца различного диаметра, значительно искажающие размеры кружков. Применение иммерсии при контактной печати полностью устраняет образование черных колец и кружков в центре

прозрачных дисков растра и позволяет получить неискаженное изображение черных кружков негатива (рис. 11, 2).

#### Выводы

1. Поверхность желатинового слоя проявленного фотографического изображения является сложной криволинейной поверхностью, состоящей из поверхностей многочисленных сферических, цилиндрических, конических, кольцевых и фигурных положительных и отрицательных линз и призм. Линзовые элементы проявленного слоя имеют фокусные расстояния от нескольких сотых долей миллиметра до бесконечности.

2. При использовании диаизображения в проекционной системе (фотоувеличитель, диапроектор) в обоих полупространствах, ограничиваемых диаизображением, образуется множество действительных и мнимых изображений источника света такой системы. Изображения, образованные короткофокусными линзами, расположены вблизи эмульсионного слоя и являются наиболее яркими.

3. Проведена экспериментальная проверка влияния линзового эффекта при контактной печати на качество получающихся изображений для случая копирования круглых черных кружков. Обнаружены черные точечные и кольцевые изображения под черными кружками негатива и показано, что применение иммерсии при копировании негатива полностью устраняет отрицательное влияние линзового эффекта.

4. Диффузный ореол в определенной степени маскирует проявления линзового эффекта при контактной печати. Отрицательное влияние последнего должно увеличиваться при переходе к высококачественным позитивным слоям с малой мутностью, высокой разрешающей способностью и слабо выраженным диффузным ореолом.

5. Наложение изображений источника света, образованных линзовыми элементами проявленного фотографического изображения, является одной из причин образования макрозернистости и других эффектов, связанных с перераспределением света в проекционном оптическом изображении.

6. Влияние линзового эффекта на качество изображения должно учитываться как при создании высококачественных слоев для микрорепродукции, так и при разработке технологии их обработки и использования готового фотографического диаизображения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. E. Ross. *Astrophys. J.*, 52, 98, 1920.
2. F. E. Ross. *The Physics of the Developed Photographic Image*. New York, 1924.



К. В. ВЕНДРОВСКИЙ, И. З. ПАКУШКО

### ОБРАЗОВАНИЕ ОРЕОЛОВ ОТРАЖЕНИЯ В ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СЛОЯХ\*

Ореолы отражения с теоретической стороны были исследованы Дрекером [1] много лет назад. Этой работе в течение долгого времени не уделялось достаточного внимания. Но в последнее время ореолы отражения снова привлекают к себе внимание специалистов, так как в некоторых случаях они могут играть важную роль в процессах образования фотографического изображения и сказываться на качестве фотографической репродукции, в частности на передаче мелких деталей и на резкости изображения [2, 5]. При оценке качества передачи изображения с помощью частотно-контрастной функции обычно учитывают только функцию рассеяния [3]. Но этого недостаточно, если имеют место ореолы отражения, так как их интенсивность, как показано ниже, зависит от размеров и формы изображения и его расстояния от данной точки. В настоящей работе мы взяли за исходную точку основные положения, высказанные впервые Дрекером, развили их для некоторых частных случаев и экспериментально проверили выполнимость полученных уравнений для современных фотографических слоев.

#### Механизм образования ореолов отражения

Как известно, ореол отражения образуется главным образом за счет света, рассеянного при прохождении через фотографический слой и отраженного от поверхности раздела «основа—воздух» под углом полного внутреннего отражения и под большими углами (рис. 1). Из простых геометрических соображений ясно, что если на фотографический слой наложена малая световая площадка  $\Delta S$  и если фотографический слой равномерно рассеивает свет по всем направлениям, то освещенность, создаваемая на фотографическом слое ореолом отражения на расстоянии  $R$  от этой площадки, может быть подсчитана по формуле

$$E_0 = \rho B \cos^2 \alpha \frac{\Delta S}{r^2}, \quad (1)$$

где  $r$  — длина хода светового пучка в основе;  $\alpha$  — угол падения рассеянного света на границу «основа—воздух»;  $B$  — яркость площадки, рассматриваемой со стороны основы;  $\rho$  — коэффициент отражения на границе «основа—воздух».

Очевидно, что эта формула может быть использована лишь в том слу-

\* Доложено на симпозиуме по структурным свойствам фотографических материалов и их информационной способности, состоявшемся в Казани 30 сентября 1963 г.

чае, когда световую площадку можно рассматривать как точечный источник света, т. е. если поперечник ее проекции на плоскость, перпендикулярную направлению светового пучка, не превышает 5—10% от длины сечения светового пучка. Коэффициент отражения при углах, равных или больших углах полного внутреннего отражения, равен единице. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$E'_0 = B \cos^2 \alpha \frac{\Delta S}{r^2}. \quad (2)$$

При углах, меньших угла полного внутреннего отражения, вместо  $\rho$  следует подставить выражение, даваемое формулой Френеля, и соотношение (1) принимает вид

$$E''_0 = \frac{B \cos^2 \alpha \Delta S}{2r^2} \left[ \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \right]. \quad (3)$$

Исходя из приведенных соотношений можно рассчитать освещенность, создаваемую ореолом отражения от светящейся площадки любой конфигурации. Разберем два практически наиболее важных случая: образование ореола тонкой полоской и образование ореола в центре кольца.

В своих расчетах мы для простоты не будем рассматривать световые пучки, падающие на границу раздела под углами, меньшими угла полного внутреннего отражения, так как коэффициент  $\rho$  при этих углах существенно меньше единицы. Поэтому в последующих уравнениях нижний предел интегрирования не может быть меньшим угла полного внутреннего отражения.

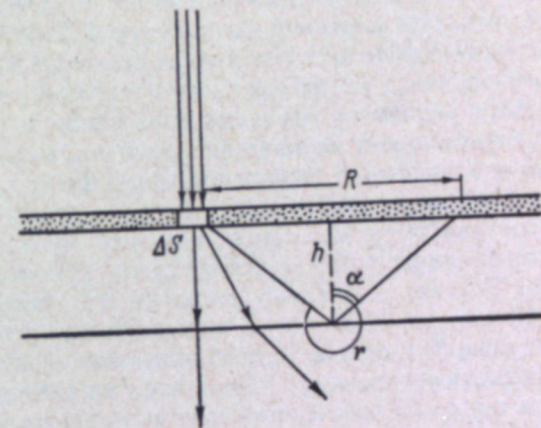


Рис. 1. Схема образования ореола отражения.

Для того чтобы решить задачу об ореоле, создаваемом тонкой одиночной полоской, примем, что  $\Delta S = a \Delta R$ , где  $a$  — ширина полоски. Тогда

$$E'_0 = \frac{aB \cos^2 \alpha \Delta R}{r^2}. \quad (2')$$

Если точка, для которой мы определяем освещенность, расположена на оси полоски и  $h$  есть толщина основы, то

$$R = 2h \operatorname{tg} \alpha, \quad dR = \frac{2h}{\cos^2 \alpha} d\alpha \quad \text{и} \quad r = \frac{2h}{\cos \alpha}.$$

Следовательно, суммарная освещенность в данной точке равна

$$E_2 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{aB \cos^2 \alpha}{2h} d\alpha = \frac{aB}{4h} \left( \alpha_2 - \alpha_1 + \frac{\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1}{2} \right). \quad (4)$$

Если точка расположена в стороне от оси полоски, то пределами интегрирования будут углы отражения для пучков, направленных в ближайший участок полоски и в ее конец.

В том случае, когда ореол отражения создается наложенным на пленку световым кольцом с внутренним радиусом  $R$ ,

$$dS = RdRd\varphi.$$

Следовательно,

$$E_z = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{R_1}^{R_2} \frac{B \cos^2 \alpha RdR}{r^2} = 2\pi B \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha d\alpha = \pi B (\cos^2 \alpha_1 - \cos^2 \alpha_2). \quad (5)$$

К разобранному случаю могут быть сведены с той или иной степенью точности все другие возможные варианты.

#### Методика опытов

Для экспериментальной проверки выведенных уравнений использовались четыре негативные пленки:

Образец пленки	1	2	3	4
Светочувствительность (ед. ГОСТ)	13	90	165	330
Коэффициент контрастности $\gamma$	3.5	1.6	2.4	1.6

Приведенные характеристики соответствуют экспонированию светом источника с цветовой температурой  $2850^\circ \text{K}$  и 5 мин. проявления в проявителе Чибисова. Все использованные пленки были политы на прозрачной основе и не имели противоореольного слоя. Однако у пленок 3 и 4 между основным эмульсионным слоем и основой был полит слой низкочувствительной мелкодисперсной эмульсии. Во второй половине опытов вместо пленки 3 использовалась пленка, близкая к ней по свойствам.

Пленки экспонировались на резольвомetre CP-17 с объективом, имеющим апертуру 0.2. При проверке уравнений (1)–(3) в резольвомetre вместо миры помещали металлическую пластинку с отверстием диаметром 3.5 мм. Объектив создавал на пленке изображение, уменьшенное в 42 раза, т. е. световая площадка на пленке имела диаметр 83.5 мк. Образуемый ореол, как обычно, имел форму кольца, окружающего центральную площадку. При толщине основы 130–140 мк радиус кольца был около 250 мк и оно тесно соприкасалось с ореолом рассеяния. Кроме того, в этом случае источник ореола нельзя было рассматривать как точечный. Чтобы увеличить радиус ореола, во время экспонирования под пленку подкладывали стеклянную пластинку, а пространство между основой и стеклом заполняли глицерином. Суммарная толщина стекла и основы составляла в этом случае 1.5 мм. В результате радиус ореола увеличивался до 2.7 мм и тем самым устранялись отмеченные выше трудности.

Полученные изображения измерялись на микрофотометре с измерительной щелью  $10 \times 130$  мк. На основании промеров и характеристических кривых, полученных на той же пленке, экспонированной и проявленной параллельно с изображениями ореолов, строились кривые зависимости освещенности, создаваемой ореолом отражения, от расстояния до световой площадки.

Если для фотографического слоя соблюдаются закономерности, описываемые уравнениями (1)–(3), то тем самым обеспечивается и соблюдение интегральных выражений (4)–(5). Однако, учитывая, что в первом случае ошибки опыта неизбежно существенно больше, чем во втором, полезно проверить также выполнение хотя бы одного из последних выражений. Было решено измерить ореолы отражения в центре шести колец различной ширины. Внутренний диаметр колец был таким, что угол отражения, образуемый пучком света, идущим от этого края кольца, был близок к углу полного внутреннего отражения. Внешний диаметр колец был таким, что углы отражения для пучков, идущих от внешнего края кольца,

были  $49^\circ$ ,  $51^\circ 15'$ ,  $54^\circ 05'$ ,  $58^\circ 15'$ ,  $63^\circ 40'$ ,  $72^\circ 45'$ . Методика работы была аналогична использованной в предыдущих опытах, не применялось лишь утолщение основы с помощью стекла.

#### Результаты опытов

На рис. 2 изображены результаты проверки уравнений (1)–(3) по описанной методике. По оси абсцисс отложены расстояния  $R$  от центра

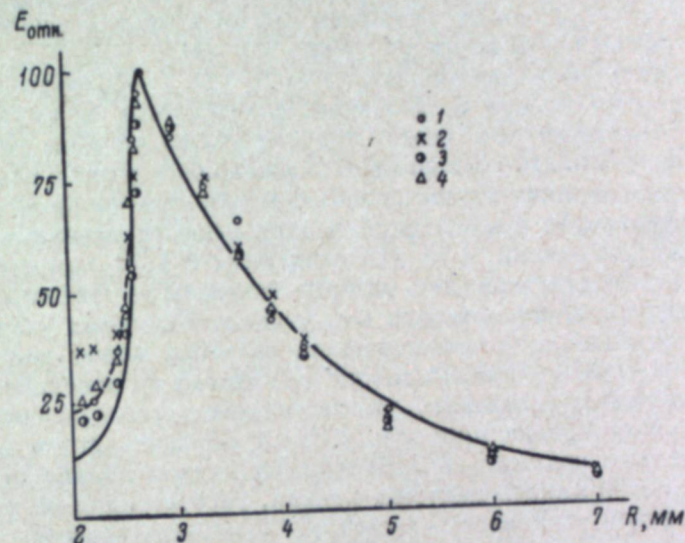


Рис. 2. Зависимость освещенности, создаваемой ореолом отражения от малой световой площадки, от расстояния до центра площадки.

световой площадки, а по оси ординат освещенности  $E$  в относительных единицах. Четыре вида точек, нанесенных на график, соответствуют каждой из четырех испытанных пленок. Освещенность, соответствующая максимуму ореола, для всех пленок была принята за 100. Сплошная линия на графике рассчитана по уравнениям (2), (3). При расчетах левой ветви кривой было принято во внимание, что угловой размер площадки, рассматриваемой из точки, соответствующей максимуму ореола отражения, был равен почти  $1^\circ$  и, следовательно, спад освещенности вдоль радиуса ореола происходил в этом случае несколько медленнее, чем для точечного источника. При вычислениях по уравнению (2) этим обстоятельством можно пренебречь.

В соответствии с уравнением (5) экспозиция, создаваемая ореолом отражения в центре светового кольца, в наших опытах должна была возрастать пропорционально разности квадратов косинусов перечисленных выше полного внутреннего отражения. На логарифмы  $\Delta \cos^2 \alpha$ , а по оси ординат относительных единицах.

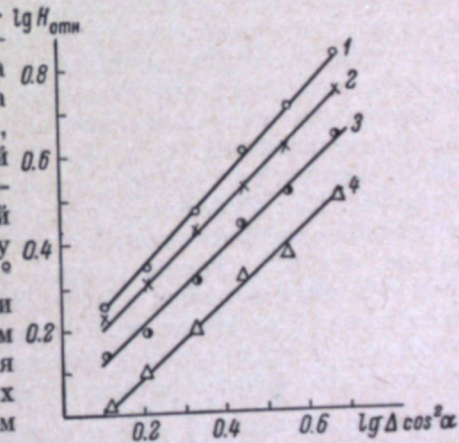


Рис. 3. Зависимость интенсивности ореола отражения в центре кольца от угловых размеров кольца  $\alpha$ .

пропорционально разности квадратов косинусов перечисленных выше полного внутреннего отражения. На логарифмы  $\Delta \cos^2 \alpha$ , а по оси ординат относительных единицах.

Как видно из приведенных графиков, отклонения экспериментальных результатов от расчетных кривых в обоих опытах невелики. Наиболее существенные отклонения наблюдаются в нижней части левой ветви кривой рис. 2. Объясняется это тем, что нами не учитывалось вторичное отражение света от эмульсионного слоя, которое может быть довольно значительным. Коэффициент отражения эмульсионного слоя в воздухе  $\rho'$  равен примерно 0.2, а коэффициент отражения для полностью рассеянного света на границе «желатин—воздух»  $\rho''$  равен 0.6 [4].

Из очевидного соотношения  $\rho' = \rho(1 - \rho'')$ , где  $\rho$  — коэффициент отражения бромистого серебра в желатине, следует, что от эмульсионного слоя может отразиться 50% света, пришедшего со стороны основы. Необходимо также принять во внимание неизбежное в наших опытах отражение света на границах «основа пленки—глицерин—стекло». Хотя разница в коэффициентах преломления  $n$  этих веществ невелика ( $n$  равно примерно 1.46 для основы, 1.48 для глицерина и 1.50 для стекла), для расстояний, соответствующих тем, которые нанесены на график, отражение от этих границ будет происходить под углами, большими угла полного внутреннего отражения, и интенсивность засветки может достигать нескольких процентов от интенсивности в максимуме основного ореола. Измерения образцов показали, что освещенность, создаваемая вследствие этих причин, равна примерно 10% от освещенности в максимуме ореола и довольно равномерно распределена внутри кольца ореола. На рис. 2 прерывистой линией нанесена кривая, рассчитанная по уравнению с учетом указанной равномерной засветки. Совпадение расчетных и экспериментальных результатов в этом случае почти полное.

Отклонения экспериментальных точек от правой ветви кривой невелики, но, как нельзя не заметить, носят систематический характер: экспериментально определенный спад освещенности несколько круче, чем вытекает из расчета. Это можно объяснить двойным образом. Во-первых, указанная выше засветка действует и при расстояниях, больших, чем 2.7 мм, постепенно теряя свою интенсивность. Во-вторых, фотографический слой, вероятно, рассеивает свет не полностью и поэтому сила света при больших углах рассеяния несколько меньше, чем при малых. Надо полагать, что на нашем результате сказались обе причины.

Отмеченные поправки слишком малы, чтобы сыграть роль при интегрировании выражений (4) и (5). В этом можно убедиться, рассматривая рис. 3. Наклон всех четырех прямых очень близок к предполагаемому наклону  $45^\circ$ . Как и следовало ожидать, исходя из результатов первых опытов наклон экспериментальных прямых в большинстве случаев несколько меньше, чем  $45^\circ$ . Однако разница между расчетными и экспериментальными величинами лежит в пределах нескольких сотых логарифма экспозиции и вряд ли может иметь существенное практическое значение.

Говоря о роли ореолов отражения, интересно оценить их влияние на контраст фотографического изображения. В опытах с кольцами отношение экспозиций  $\frac{H_0}{H_1}$  в наиболее широком кольце и в его центре можно непосредственно оценить, пользуясь сенситометрическими данными:

Образец пленки . . . . .	1	2	3	4
$\frac{H_0}{H_1}$ . . . . .	6.0	7.0	28.5	13.0

Если бы ореолов отражения не было, то цифры были бы во много тысяч раз большими (если пренебречь рассеянием света в оптике), так как

диффузно рассеянный свет в эмульсионном слое. **МЕ И ЕГО СВЯЗЬ**  
внутреннему радиусу кольца, практически полностью. **ЧЕНИЕМ**  
примера можно указать, что в пленке 2 диффузно рассеянный свет  
ляется в 10 раз уже на расстоянии 19 мк. Следовательно, при внутр.  
радиусе кольца 240 мк он ослабляется больше чем в  $10^{20}$  раз, прежде чем  
дойти до центра.

Особенностью ореолов отражения является то, что их размер и интенсивность зависит от величины изображения и толщины основы. По условиям эксперимента в первых опытах мы не могли непосредственно измерить абсолютную величину интенсивности ореолов вокруг маленькой площадки. Однако уравнения (4) и (5) позволяют подсчитать, во сколько раз уменьшится интенсивность ореола отражения при переходе от широкого кольца к площадке диаметром 83.5 мк и одновременном утолщении основы от 130 до 1500 мк. Расчет показывает, что отношение  $\frac{H_0}{H_1}$  при таком переходе увеличивается в 8000 раз и составляет:

Образец пленки . . . . .	1	2	3	4
$\frac{H_0}{H_1}$ . . . . .	48000	56000	228000	104000

Если бы толщина основы не изменялась, то цифры были бы примерно на два порядка меньшими. В остальном изменение  $\frac{H_0}{H_1}$  обусловлено изменением формы и размера изображения.

Из приведенных цифр ясно, что ореолы отражения могут существенно сказаться на качестве фотографического изображения прежде всего в тех случаях, когда мы имеем дело со съемкой мелких темных деталей на светлом фоне, например при микрофильмировании. Если же объект съемки состоит из темного фона с мелкими светлыми деталями, то ореолы отражения будут практически незаметны. Этим в значительной мере объясняется хорошо известное в практике микрофильмирования различие в воспроизведении мелких деталей, получаемом при съемке изолированных черных штрихов на белом фоне, и наоборот. Ореолы отражения в виде колец вокруг изображения мелких светлых объектов становятся заметными лишь при больших контрастах фона и светлой детали и сильных передержках. Таким путем возникают, например, кольцевые ореолы вокруг изображения фонарей при ночных съемках. В том, насколько они заметны, большую роль играет светорассеяние в оптике. Радиус ореола отражения на пленках обычно составляет около 250 мк. Свет, рассеянный объективом, на таких расстояниях от яркой точки часто оказывается таким же или даже более интенсивным, чем ореол отражения, и маскирует последний.

Наконец, надо помнить, что приведенные выше данные относятся к пленкам на бесцветной основе и без противоореольных слоев, снижающих интенсивность ореолов отражения. Противоореольные слои снижают интенсивность ореола независимо от угла отражения. В подкрашенной основе световой пучок будет ослабляться в зависимости от его длины по экспоненциальному закону. Но, поскольку в интегральные выражения (4) и (5) основной вклад вносится пучками, отраженными в пределах примерно от  $40^\circ$  до  $60^\circ$ , этим различием можно пренебречь без больших потерь для окончательного результата.

### Выводы

Рассмотрены закономерности образования ореолов отражения в фотографических слоях. Выведенные соотношения основываются на предположении о полном рассеянии света фотографическими слоями.

Экспериментальная проверка показала, что они выполняются с точностью, достаточной для практических целей. Показано также, что интенсивность ореолов отражения существенно зависит от формы и размеров изображения, служащего источником ореола.

Авторы благодарны проф. Г. А. Истомину за ценные замечания, сделанные им при обсуждении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Drecker, Z. wiss. Photogr., 1, 183, 1903.
2. Г. А. Истомин. Техника кино и телевид., 5, вып. 2, 1, 1961.
3. H. Frieser, Phot. Sci. a. Eng., 4, 324, 1960.
4. D. B. Judd, J. Research Nat. Bureau of Standards, 29, 32, 1942.
5. H. Frieser, Mitt. Agfa Leverkusen—München, 1, 129, 1955.

### III. ТЕЛЕВИЗИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ И ЕГО СВЯЗЬ С ФОТОГРАФИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ

В. С. ГДАЛИН

#### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ВОСПРОИЗВОДИМОГО ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ ПРИЕМНЫМИ ТРУБКАМИ

##### Введение

Воспроизведение телевизионного изображения высокого качества является одной из важнейших проблем телевизионной техники. Решение этой проблемы обусловлено, с одной стороны, техническим совершенствованием телевизионных систем, с другой — требованиями, которые предъявляются к качеству телевизионного изображения. Однако предъявление таких требований оказывается весьма сложной задачей, так как, кроме чисто технических соображений, необходимо принимать во внимание соображения физиологического и психологического порядка.

Поскольку телевизионное изображение является репродукцией оптического изображения, то прежде всего необходимо кратко рассмотреть положение с оценкой качества оптического изображения.

В процессе развития оптики для этой цели были предложены различные критерии. Весьма длительное время таким критерием служила разрешающая сила оптической системы. Однако в последнее время взгляд на этот критерий резко изменился. Было доказано [1, 2, 3], что качество изображения не связано однозначно с разрешающей силой, так как она характеризует передачу только мелких деталей изображения с весьма малым значением контраста.

Качество оптического изображения оценивалось также с помощью переходных и частотных характеристик оптических систем [3]. Однако и в этом случае установить прямую количественную связь между качеством изображения и объективными характеристиками оптических систем также не удалось, так как эти характеристики не могли связать всей совокупности факторов, определяющих качество изображения.

Менее распространенным критерием является отношение освещенности изображения в центре дифракционного пятна к такой же величине для идеальной системы. Это отношение иногда называют числом Штреля [2]. При волновых aberrациях, не выходящих за предел Релея, число Штреля больше 0.8 и изображение практически неотличимо от того, которое может дать безабберационная система той же апертуры.

По мнению О. Шаде [3, 9] наилучшее представление о качестве изображения дает совокупность значения контраста больших площадей и семейства амплитудно-частотных характеристик систем. Однако на практике все эти критерии не дают прямой корреляции между объективными характе-

ристиками оптических систем и качеством воспроизводимого ими изображения.

Таким образом, следует признать, что до настоящего времени не существует единой достаточно полной системы критериев оценки качества оптического изображения. Сущность всей проблемы весьма ясно сформулировал в 1951 г. Артур Кокс [3: стр. 284] «Важная практическая проблема состоит в том, чтобы перебросить мост через пропасть между пониманием того, что качество изображения связано с формой светового пятна, и представлением этой коррелятивной связи в простом количественном виде».

Следовательно, выбор такого критерия или группы критериев качества изображения, который имел бы перспективу стать общепринятым, и является в настоящее время главной проблемой оценки качества оптического изображения.

### Оценка качества телевизионного изображения

При оценке качества телевизионного изображения прежде всего необходимо исходить из того факта, что оно является репродукцией оптического изображения. Оригинал изображения всегда содержит больше данных, чем может воспринять глаз наблюдателя. Количество информации, воспринимаемое наблюдателем, в основном ограничивается следующими физиологическими характеристиками глаза: разрешающей способностью, контрастной чувствительностью и инерционностью зрения. Поэтому при оценке качества телевизионного изображения необходимо определить, какое соотношение должно существовать между характеристиками качества оригинала и изображения с учетом особенностей визуального восприятия. При такой постановке вопроса качество телевизионного изображения может быть определено не с художественной точки зрения, а с точки зрения лишь его чисто технических характеристик, к которым в случае черно-белого телевизионного изображения, относятся: 1) размер изображения, 2) число строк разложения, 3) средняя яркость, 4) частота мельканий, 5) контраст, 6) число градаций яркости, 7) четкость, 8) равномерность фона, 9) геометрические искажения, 10) периодические паразитные сигналы и 11) флуктуационные паразитные сигналы (шумы).

Из приведенного перечня следует, что оценить качество изображения какой-либо одной из этих характеристик нельзя, так как ухудшение одной из них резко снижает качество изображения в целом и даже может сделать его вообще непригодным для наблюдения. Таким образом, качество телевизионного изображения характеризуется всей совокупностью его основных параметров, которые можно разделить на две принципиально различные группы.

Первая группа — это параметры, совершенствование которых может достигать высокой степени за счет тщательной технической отработки телевизионных систем, причем совершенствование каждого из них не связано друг с другом. К этой группе относятся: размер изображения, число строк разложения, частота мельканий, яркость, равномерность фона, геометрические искажения и все периодические паразитные сигналы.

Вторая группа — это параметры, которые взаимно обуславливают друг друга и совершенствование которых является серьезной проблемой. К этой группе относятся: контраст, четкость, число градаций яркости и флуктуационные паразитные сигналы (шумы). Требуемая степень совершенствования параметров этой группы обусловлена особенностями визуального восприятия.

Поскольку совершенствование первой группы показателей не является сложной задачей, перейдем к рассмотрению качественных показателей изображения второй группы.

### Контраст

Среди факторов, управляющих визуальным восприятием телевизионного изображения, контраст занимает одно из главных мест.

Под контрастом изображения, воспроизводимого приемной телевизионной трубкой, обычно понимается отношение яркости наиболее светлых полей изображения  $B_{\max}$  к яркости наиболее темных его участков  $B_{\min}$ , где ток луча трубки равен нулю:

$$K = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}.$$

Известно, что телевизионное изображение при контрасте 30 оценивается как хорошее, а при контрасте 100 как отличное [4]. Дальнейшее увеличение контраста изображения не дает практически улучшения его качества.

Исследованию контраста приемных трубок за период 1939—1959 гг. посвящено сравнительно немного работ [5—8]. Основной из них является работа Лоу [5], где проведен глубокий анализ основных факторов, снижающих контраст изображения на экране приемных трубок: ореол, кривизна экрана, нормальное отражение света, идущего к наблюдателю (отражение на границе экрана «стекло—воздух»), и отражение от стенок колбы. Была установлена зависимость величины контраста от размеров воспроизводимых на экране приемной трубки деталей изображения.

В случае воспроизведения изображения, состоящего из одного белого и одного черного полей, площади которых соответственно равны половине площади изображения контраст достигает своего максимального значения порядка нескольких сотен единиц. Такое значение контраста было названо максимальным, или полным, контрастом.

В случае воспроизведения изображения, содержащего одно малое темное поле, размеры которого не превышают двойной толщины стекла экрана трубки, на белом поле изображения контраст достигает своего нижнего граничного значения порядка единиц. Такое значение контраста было названо детальным контрастом.

Можно сделать следующие основные выводы.

1. Контраст телевизионного изображения, воспроизводимого на экране приемной трубки, зависит от размеров и формы его деталей. Поэтому требуемое значение контраста должно быть всегда увязано с ними.

2. Имеется два граничных значения контраста: максимальный и детальный. Максимальный контраст достигает значения 200, а детальный — 20.

3. Падение контраста с уменьшением размеров передаваемых деталей изображения до двойной толщины стекла экрана трубки определяется исключительно рассеянием и отражением света в этом экране.

4. Закон изменения яркости на границе черно-белого перехода на экране приемной трубки (без учета апертурных искажений) определяется исключительно рассеянием света в толще стекла экрана трубки. Протяженность зоны размытия этого перехода примерно равна тройной толщине стекла экрана трубки.

Для оценки контраста современных телевизионных приемных трубок нами были сняты зависимости контраста от размеров воспроизводимых деталей изображения для трубок с металлизированным покрытием экрана и без него, для экранов из обычного и нейтрально-серого стекла. Экспериментальные образцы трубок имели диаметр экрана 180 мм, размер раstra 120×90 мм и толщину стекла экрана 5 мм. Измерение контраста производилось по изображению шахматного поля с помощью объективного фотометра, использующего фотоэлектронный умножитель.

Размер полей шахматного поля выражался в относительных значениях высоты изображения  $\frac{H}{h}$ , где  $H$  — общая высота изображения, а  $h$  — высота изображения шахматного поля.

Экспериментально снятые зависимости контраста от размеров деталей изображения приведены на рис. 1.

Анализ этих зависимостей показывает, что на величину полного и детального контраста оказывают влияние и толщина и коэффициент пропускания стекла экрана трубки.

Характер этих зависимостей различен для трубок, экраны которых имеют металлизированное покрытие, и для трубок без него. Это обусловлено тем, что в трубках с металлизированным покрытием экрана контраст определяется в основном лишь ореолом, а в трубках без такого покрытия контраст определяется и ореолом, и отражением от внутренних стенок трубки. Для обоих типов трубок характерно то, что значение детального контраста на деталях, размеры которых меньше двойной толщины стекла экрана, остается практически неизменным.

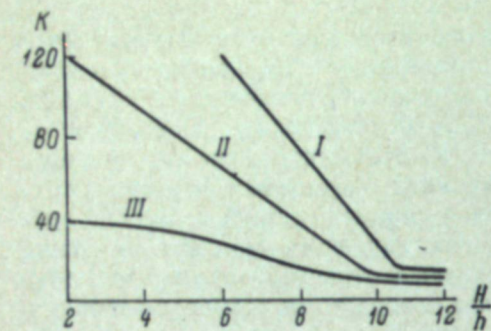


Рис. 1. Зависимость контраста от размеров деталей изображения.

I — экран металлизированный, стекло серое; II — экран металлизированный, стекло обычное; III — экран неметаллизированный, стекло обычное.

На основании проведенного исследования можно сделать весьма важное заключение, что телевизионное изображение, содержащее множество деталей, размеры которых изменяются от размеров раstra до размеров толщины стекла экрана трубки, не может быть оценено одним значением контраста, а требует определения ряда значений контраста.

### Четкость

Другое важнейшее свойство телевизионного изображения — четкость — определяется контрастом мелких деталей изображения. На четкость оказывает сильное влияние существенное различие в структуре изображения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Все это создает известные трудности в установлении соотношения между субъективным восприятием четкости и объективными характеристиками телевизионных систем.

Принятый телевизионный стандарт на 625 строк разложения принципиально обеспечивает высокую четкость изображения. Однако потенциальные возможности этого стандарта еще полностью не реализованы, так как существующие телевизионные системы воспроизводят мелкие детали изображения с весьма низким значением контраста, что приводит в конечном счете к потере этих деталей, т. е. к понижению четкости изображения.

Рассмотрим факторы, определяющие контраст мелких деталей изображения на экране приемной трубки.

Способность трубки воспроизводить мелкие детали изображения с определенным контрастом оценивается по ее частотной или апертурной характеристике, показывающей относительное изменение глубины модуляции сигнала светового изображения в зависимости от ширины штрихов или частоты сигнала. Апертурная характеристика трубки в общем виде представлена на рис. 2.

Исследованию апертурных характеристик приемных трубок посвящен ряд работ [9—11]. Однако результаты их не дают возможности оценить качество телевизионного изображения, в частности его четкость, так как апертурные характеристики не имеют связи с величиной контраста в крупных деталях изображения.

Как было показано выше, величина контраста на экране приемной трубки при уменьшении размеров воспроизводимых деталей изображения падает от максимального значения до значения детального контраста, причем это падение целиком обусловлено рассеянием и отражением света в стекле экрана трубки. Лишь при дальнейшем уменьшении размеров деталей, когда они становятся соизмеримыми с размерами разворачивающегося пятна, происходит падение контраста за счет апертурных искажений трубки. Исходный уровень апертурных характеристик приемных трубок, где условно глубина модуляции яркости принимается равной 100%, соответствует значению детального контраста, и в пересчете на максимальный контраст глубина модуляции яркости изображения уже будет составлять всего лишь 70—80% от максимального значения глубины модуляции яркости на крупных деталях изображения.

Поэтому оказалось необходимым устранить односторонность в оценке качества телевизионного изображения по одним апертурным характеристикам в отрыве от контраста крупных деталей. Было предложено перейти при оценке качества изображения от двух показателей качества — контраста и четкости — к трем: контрасту крупных, средних и мелких деталей.

Под крупными и деталями изображения подразумеваются детали, размеры которых больше двойного значения толщины стекла экрана приемной трубки. Под средними деталями изображения подразумеваются детали, размеры которых меньше двойной толщины стекла экрана трубки, но несколько больше размеров ее разворачивающей апертуры. Под мелкими деталями изображения подразумеваются детали, сравнимые с размерами разворачивающей апертуры трубки и меньшие их.

Единый подход к оценке воспроизведения контраста всех деталей устраняет неоднозначность в оценке качества телевизионного изображения. Он дает возможность оценить падение контраста на экране приемной трубки за счет различных факторов, определяющих этот контраст, т. е. оценить падение четкости падением контраста во всех деталях изображения.

### Число градаций яркости

Максимальное число различных градаций яркости  $m$  при визуальном восприятии телевизионного изображения определяется из известного [12] соотношения

$$m \cong \frac{1}{k_0} \ln \frac{B_{\max}}{B_{\min}},$$

где  $k_0$  — контрастная чувствительность глаза.

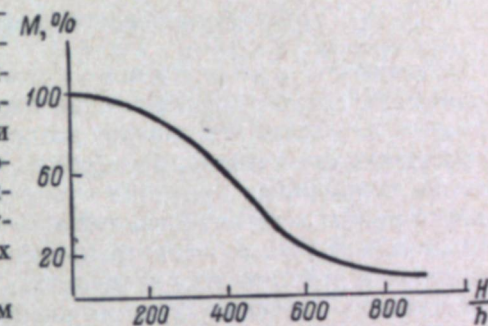


Рис. 2. Апертурная характеристика телевизионной приемной трубки.

$$M = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{0\max} - B_{0\min}}$$

Здесь  $B_0$  — яркость на самых крупных деталях.

Из указанного соотношения следует, что при постоянной контрастной чувствительности глаза максимальное число различных градаций яркости полностью определяется контрастом воспроизводимых деталей изображения.

Так как значение контраста деталей телевизионного изображения зависит от их относительных размеров, то максимальное число различных градаций яркости изображения также зависит от размеров деталей.

Из этого факта следует, что телевизионное изображение, содержащее множество деталей с различными относительными размерами, не может быть оценено одним значением максимального числа градаций яркости. Каждому размеру деталей соответствует свое максимальное число различных градаций яркости изображения.

### Флуктуационные паразитные сигналы (шумы)

Наличие флуктуационных помех на телевизионном изображении создает специфические трудности при оценке его качества. Эти помехи нарушают нормальное восприятие изображения и понижают контраст всех его деталей. Вследствие этого падает четкость и уменьшается число различных градаций яркости телевизионного изображения. Все это приводит к весьма сложной зависимости качества телевизионного изображения от уровня и спектрального состава шумов. На практике принято мешающее действие шумов оценивать отношением полезного сигнала к эффективному значению шума по пятибалльной системе [4, 12].

При значении отношения полезного сигнала к эффективному значению шума порядка 50 изображение оценивается как отличное, а при отношении порядка 100 оно неотличимо от оригинала.

Влияние флуктуационных помех на качество телевизионного изображения является самостоятельной проблемой телевизионной техники и выходит за рамки данного рассмотрения.

### Заключение

Рассмотрение основных параметров качества позволило предложить для оценки качества телевизионного изображения характеристику передачи деталей (рис. 3), которая представляет собой зависимость передачи контраста деталей от их относительного размера

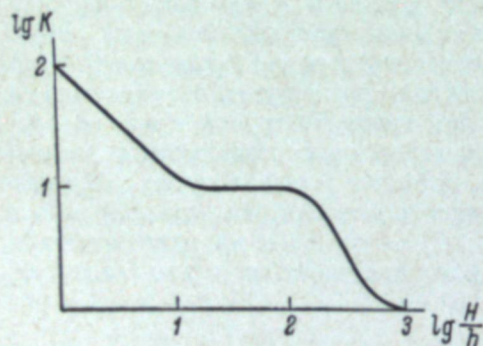


Рис. 3. Характеристика передачи деталей телевизионной приемной трубки.

$$K = f\left(\frac{H}{h}\right).$$

Характеристика передачи деталей имеет два принципиально различных участка: на первом падение контраста обусловлено исключительно рассеянием и отражением света в стекле экрана приемной трубки, на втором же

падение контраста обусловлено апертурными искажениями развертывающего пятна.

На форму и протяженность этой характеристики можно влиять как улучшением оптических свойств стекла экрана трубки, так и уменьшением апертурных искажений ее развертывающего пятна. Эффективность такого воздействия будет определяться соотношением этих факторов.

Характеристика передачи деталей позволяет установить простую количественную связь между основными параметрами телевизионного изображения (контраст крупных, средних и мелких деталей) и объективными характеристиками телевизионных систем. Это дает возможность предъявить обоснованные требования к отдельным звеньям телевизионных систем, в том числе и к приемной трубке.

Для общей оценки качества телевизионного изображения может быть предложен критерий в виде отношения площадей под участками кривой характеристики передачи для крупных, средних и мелких деталей к площадям прямоугольников, характеризующих передачу этих деталей со 100%-м контрастом. Такая оценка может быть проведена как графически (рис. 4), так и аналитически.

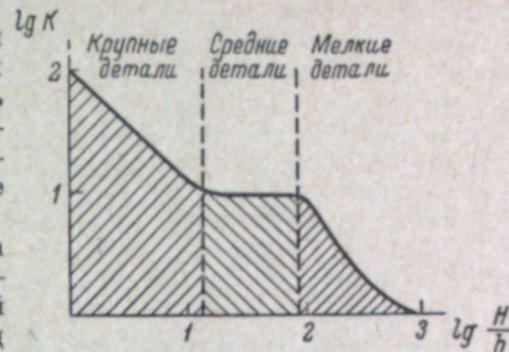


Рис. 4. Оценка способности телевизионной приемной трубки к воспроизведению деталей изображения по контрасту их передачи в отдельных их группах по размерам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Оптика в военном деле, т. II. Сб. под ред. С. И. Вавилова и М. В. Савостьяновой, Изд. АН СССР, М.—Л., 1948.
2. Г. Г. С л ю с а р е в. Методы расчета оптических систем. ГТТИ, М.—Л., 1937.
3. Оценка качества оптического изображения. Сб. под ред. О. А. Герасимовой, Геодезиздат, М., 1959.
4. В. К. З в о р ы к и н, Д. А. М о р т о н. Телевидение. ИЛ, М., 1956.
5. R. R. L a w, Proc. IRE, 27, 511—525, 1939.
6. J. H. H a i n e s, Tele-Techn., 12, 100—102, 179—181, 1953.
7. A. E. M a r t i n, R. Q. V o g e l, F. W. H a r j e s, Radio a. Television News, 45, № 6, 3—5, 27, 1951.
8. F. A r p, Rundfunktechn. Mitt., 3, № 3, 1959.
9. O. H. S c h a d e. Apparatus for measuring the quality of a kinescope. USA Patent 2 731 597, 1956.
10. Л. А. Щ е р н а к о в а. Экспериментальное исследование частотных характеристик электронно-лучевых телевизионных приемных трубок. Автореф. канд. дисс. М., 1953.
11. Л. М. С е л ь к о в. Частотные и переходные характеристики приемных телевизионных трубок с учетом явления ореола. Автореф. канд. дисс. М., 1955.
12. А. М. Х а л ф и н. Основы телевизионной техники, Изд. «Сов. радио», М., 1958.

С. Б. ГУРЕВИЧ

## ОБ АНАЛОГИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ В ТЕЛЕВИДЕНИИ И ФОТОГРАФИИ

### Введение

Телевидение и фотография представляют собой различные методы осуществления одного и того же процесса — процесса воспроизведения изображения. В обоих этих методах входные данные содержат изображение объекта или изображение, характеризующее некоторый процесс. Было бы естественно, чтобы выходные данные и соответствие их входным во всех системах воспроизведения оценивались одинаково. В частности, чувствительность является таким свойством системы, которое хотя и зависит от механизма внутренних преобразований, но численно характеризуется только входными и выходными данными. То же самое можно сказать и о качестве воспроизведения изображения, характеристика которого не должна зависеть от того, каким способом осуществляется само воспроизведение. Таким образом, нет никаких препятствий к тому, чтобы определения чувствительности и качества воспроизведения и система их оценок были одинаковы для телевидения и фотографии. С другой стороны, имеются весьма веские причины для создания такой единой системы оценок, к которой относятся, в частности, необходимость согласования характеристик обоих способов воспроизведения при их совместном использовании и необходимость осуществления выбора того или иного способа воспроизведения для решения одних и тех же задач.

В настоящее время характеристики и методы оценок чувствительности и качества воспроизведения изображения в телевидении и фотографии существенно различны. Такое различие является следствием независимого развития фотографии и телевидения. В результате часто оказывается невозможным сравнивать между собой по чувствительности и качеству воспроизведения фотографические и телевизионные системы. Необходимы специальные пересчетные формулы, иногда с привлечением дополнительных данных, чтобы, например, согласовать характеристическую кривую фотографического материала с характеристикой «свет—сигнал» передающей телевизионной трубки или разрешающую способность телевизионных трубок и фотографических материалов. Серьезным недостатком существующих методов оценок является также то, что они не позволяют простым способом сравнивать между собой иногда даже и телевизионные системы с различными параметрами разложения и различными передающими трубками, а также различные по своим свойствам фотографические материалы.

На пути к решению практически важной задачи создания таких методов оценки чувствительности и качества воспроизведения изображения, кото-

рые были бы едины для всех методов воспроизведения, имеются и серьезные трудности. Они связаны, в частности, с существованием известных традиций среди специалистов в телевидении и фотографии. При решении этой задачи значительная работа должна быть проведена с целью установления численных критериев для различных характеристик систем воспроизведения. Очевидно, что нельзя ожидать быстрого перехода на единые системы оценок чувствительности и качества воспроизведения в телевидении и фотографии. Желательно поэтому, чтобы для тех характеристик, которые не удается сразу установить едиными, были созданы возможности легкого, быстрого и безошибочного пересчета при одновременном пользовании разными системами.

### Некоторые характеристики качества воспроизведения изображения в телевидении и фотографии

Качество воспроизведения в телевидении в настоящее время характеризуется рядом качественных показателей, которые указывают на степень воздействия на выходное изображение того или иного искажающего фактора.

Опыт эксплуатации телевизионных систем показал, что существует ряд искажений, приведенных в таблице. В ней же отмечается наличие или

Искажения в телевидении	Показатели качества в телевидении	Имеются ли подобные искажения в фотографии
Воздействие шумов системы на степень неопределенности в оценке входной энергии и ее разностей.	Количество различаемых полутонов.	Да.
Уменьшение четкости и размытие границ в выходном изображении.	Разрешающая способность системы в горизонтальном и вертикальном направлениях.	»
Смазывание изображения движущегося объекта.	Разрешающая способность во времени, инерционность.	»
Ограничения в спектральной различимости.	Количество различных спектральных зон или количество основных цветов цветного воспроизведения.	»
Несоответствия выходных градаций входным, обусловленные нелинейностью преобразования.	Степень нелинейности характеристики преобразования или телевизионной системы.	»
Неодинаковость передачи деталей изображения в зависимости от их расположения на растре.	Степень равномерности преобразований. Ограничение по паразитным сигналам.	Нет.
Зависимость характера воспроизведения изображения от содержания входного изображения.	Степень ограничения ложных сигналов.	Да.
Непропорциональность средней яркости выходного изображения средней освещенности входного для разных входных изображений.	Степень сохранения информации об уровне черного.	Нет.
Геометрические несоответствия входного и выходного изображений.	Степень ограничения геометрических искажений.	»
Спектральные несоответствия входного и выходного изображений.	Степень отступления спектральных характеристик системы от требуемых.	Да.



отсутствие соответствующих искажений в фотографии. Первые четыре вида относятся к группе искажений, которые не удается компенсировать в звеньях системы, следующих за звеньями, обуславливающими такие искажения. Остальные искажения в значительной степени могут быть исправлены коррекцией в звеньях, в которые поступает видеосигнал, уже искаженный в ранее расположенных звеньях.

Принципиальное различие искажений двух рассматриваемых групп заключается в возможности или невозможности последующей коррекции. Искажения первой группы возникают в результате преобразований по закону, который не может быть установлен, так как заранее неизвестно, как он будет изменяться от одного преобразования к другому и от одного объекта к другому. Источником таких искажений являются либо флуктуации, либо суммирование различных входных данных. В последнем случае по значению определенного интеграла, которым характеризуются выходные данные, невозможно установить, какой является подынтегральная функция, характеризующая входные данные.

Закономерности возникновения искажений второй группы остаются неизменными для целой серии преобразований и, следовательно, могут быть установлены за счет некоторого сокращения передаваемой информации. По известным закономерностям преобразования может быть установлен входной сигнал или созданы звенья с такими компенсирующими преобразованиями, что при прохождении видеосигнала через звено, содержащее источник искажения, и через корректирующее звено результирующее преобразование окажется линейным.

Следует отметить, что практически далеко не все из приведенных в таблице показателей нормированы и что не каждым из них пользуются для оценки качества воспроизведения. В большинстве случаев в телевидении воспроизведение оценивается по следующим характеристикам: а) разрешающая способность (горизонтальная, а иногда и вертикальная), б) отношение сигнал/шум и количество различных полутонов, в) паразитный сигнал и фон, г) инерционность (в редких случаях), д) характер нелинейности и характеристики преобразования и е) геометрические искажения.

В качестве примера различного подхода к оценке качества воспроизведения в телевидении и фотографии рассмотрим шумы и передачу градаций, разрешающую способность и характер нелинейности и характеристики преобразования.

Для характеристики качества воспроизведения в телевидении широко пользуются величиной отношения сигнала к шуму [1—4]. Установлено, что шумы сказываются как на передаче количества градаций, так и на разрешающей способности телевизионных систем, а также на восприятии изображения вследствие неприятного эффекта мелькания отдельных мелких участков изображения. Основным же результатом воздействия шумов является ограничение количества передаваемых градаций. В телевидении установлено соотношение между количеством передаваемых градаций яркости, величиной входной энергии и отношением сигнал/шум. При линейности характеристик передачи могут иметь место два вида зависимостей такого рода [5].

В одном случае шумы создаются вместе с сигналом на входе передающей трубки и затем усиливаются и ослабляются вместе. Для такого случая справедливо соотношение:

$$m = \kappa \phi_{\text{вх.}} = A \phi_{\text{вх.}} = A' \sqrt{W_{\text{вх.}}} \quad (1)$$

где  $m$  — число градаций;  $\phi$  — отношение сигнала к шуму;  $W_{\text{вх.}}$  — величина входной энергии излучения;  $\kappa$ ,  $A$ ,  $A'$  — постоянные коэффициенты.

В другом случае шумы оказываются независимыми от величины сигнала и смешиваются в определенном каскаде. Для этого случая связь между количеством градаций, отношением сигнал/шум и величиной входной энергии оказывается следующей:

$$m = \kappa \phi_{\text{вх.}} = BW_{\text{вх.}} \quad (2)$$

Последний случай охватывает практически все используемые передающие трубки в телевидении. При этом большое значение имеет усиление сигнала до момента, когда происходит смешение сигнала с шумами. Если это усиление настолько велико, что шумы, сопровождающие сигнал, становятся больше шумов, приносимых извне, то реализуется первый случай.

Усиление, осуществляемое после того, как отношение сигнал/шум уменьшено, не приводит к обратному увеличению отношения сигнал/шум, а лишь оставляет его неизменным. Таким образом, в необходимых случаях усиление сигнала является по сути дела профилактикой от введения искажений, приводящих к понижению отношения сигнал/шум, но повысить отношение сигнал/шум оно не может. В связи с этим сделаем несколько замечаний о контрасте передаваемого изображения. Если приемником изображения является глаз, то задача заключается в том, чтобы усилить сигнал настолько, чтобы шум изображения и соответствующий им минимальный контраст превышали контрастную чувствительность глаза. Если это условие имеет место, то дальнейшее увеличение контраста (дальнейшее усиление сигнала) не дает дополнительной информации. В этом случае, а в особенности в случаях, когда данные об изображении регистрируются чувствительным прибором, важны не величина выходного сигнала, не контраст, а отношение сигнала к шуму.

Аналогичная связь между шумами и количеством градаций, а также и контрастом должна иметь место в фотографии. К сожалению, однако, в фотографии выходные данные практически всегда характеризуются контрастом, а не отношением сигнал/шум. Уже много лет в фотографии исследуется явление зернистости и гранулярности [6, 7], однако при этом основной интерес проявляется к визуальному восприятию зерен в изображении, подобно тому как в телевидении первоначально интересовались визуальным восприятием шумов. Более важной стороной этого дела — ограничением числа различных градаций и влиянием шумов на разрешающую способность — до сих пор в фотографии занимались очень мало. Важность учета величины отношения сигнал/шум при оценке чувствительности была понята лишь в последние годы, в особенности при попытках подойти к решению этого вопроса с информационной точки зрения [8—9].

Весьма существенным является различие в оценке разрешающей способности в телевидении и фотографии.

В фотографии разрешающая способность светочувствительных материалов оценивается максимальным числом линий, имеющих ширину, одинаковую с шириной промежутков, и укладываемых в 1 мм оптического изображения, которые еще различимы в фотографическом изображении. Фактически это означает, что контраст изображения при воспроизведении такого предельного числа линий уменьшается до порога, устанавливаемого контрастной чувствительностью глаза. В последнее время в фотографии часто используются так называемые частотно-контрастные характеристики, графически выражающие зависимость контраста от числа линий, укладываемых в 1 мм.

Разрешающая способность телевизионных систем определяется числом светлых и темных линий, укладываемых в отрезки, равные высоте оптического изображения, спроектированного на рабочую поверхность светочувствительного слоя передающей телевизионной трубки, которые разли-

чаются на выходе телевизионной системы. Это означает, что контраст и отношение сигнал/шум при воспроизведении такого предельного числа линий уменьшаются до порога, устанавливаемого контрастной чувствительностью глаза или различимостью сигнала в шумах. В телевидении при оценке разрешающей способности также пользуются так называемыми *апертурными характеристиками*, графически выражающими зависимость величины полезного сигнала от числа линий, укладываемых в высоту раstra.

Наличие различных оценок в фотографии и телевидении представляет значительные неудобства при сопоставлении и совместном использовании телевизионных и фотографических систем. Возникает вопрос, какой же оценкой следует пользоваться: принятой в фотографии или принятой в телевидении?

Исходя из оценки разрешающей способности по числу линий, укладываемых в высоту оптического изображения, можно сделать вывод, что при увеличении размера рабочей части фотокатода и мишени передающей трубки разрешающая способность трубки и системы в целом повышается. Если размер пучка и число строк, приходящихся на единицу длины, оставить прежними и увеличить число элементов за счет увеличения рабочей площади фотокатода, то будет разрешено большее число деталей во всем увеличенном изображении, для чего, однако, на вход потребуется подать большую энергию.

Если же производить оценку по числу линий на единице длины, то увеличение рабочей поверхности не приведет к увеличению разрешающей способности, а в реальных трубках практически даже вызовет некоторое понижение ее. Это видно по сопоставлению 76-мм суперортикона и 25-мм видикона. По способу оценки, принятому в телевидении, разрешающая способность 76-мм суперортикона выше разрешающей способности 25-мм видикона. По способу же оценки, принятому в фотографии, получится обратная картина: разрешающая способность видикона окажется большей, чем у суперортикона.

Из сказанного следует, что во всех случаях, когда необходимо учитывать чувствительность воспроизводящих устройств и когда, следовательно, входную энергию нельзя произвольно увеличивать, разрешающую способность следует оценивать числом линий на 1 мм, как принято в фотографии. В тех же случаях, когда на вход системы может быть подана практическая любая требуемая энергия (приемная трубка, создание позитивного изображения в фотографии), разрешающую способность удобнее выражать числом линий на длине отрезка, равной высоте раstra.

Другим фактором, который следует учитывать при оценке разрешающей способности системы воспроизведения, является изменение отношения сигнал/шум с изменением размеров передаваемых деталей. Возможность применения различных усилителей, контрасторов и апертурных корректоров, изменяющих субъективно оцениваемую разрешающую способность, приводит к необходимости вводить объективную оценку, характеризующую изменение отношения сигнал/шум в зависимости от числа линий, укладываемых в единице длины.

Значительные трудности имеют место при *сопоставлении* характеристик преобразования в телевидении и фотографии. В телевидении такими характеристиками являются «свет—свет» и «свет—сигнал». Характерной особенностью сигнала является непосредственная реакция на действие света с дальнейшим линейным или нелинейным усилением этой реакции. Фактически такой реакцией является возникновение фотоэлектронов, количество которых в дальнейшем, например при недостаточном накоплении, может уменьшаться. Причиной, приводящей к уменьшению точности распознавания разности входной световой энергии по

сигналу, являются флуктуации, имеющие место во всех преобразующих звеньях. Отличительной особенностью сигнала и ограничивающих точность оценки флуктуаций является то, что их можно измерить непосредственно.

Примерная характеристика «свет—сигнал» передающей трубки типа супериконоскоп представлена на рис. 1. По оси абсцисс отложен входной световой поток, по оси ординат — величина выходного сигнала. Такой же вид имеет характеристика «свет—сигнал» видикона. Приблизительно ход зависимости силы тока сигнала  $i_c$  от светового потока  $F$  соответствует  $i_c = kF^\gamma$ . Очевидно, что  $\gamma = \frac{\lg i_{c.2} - \lg i_{c.1}}{\lg F_2 - \lg F_1}$ . Известно, что для телевизионных трубок типа иконоскоп и супериконоскоп  $\gamma = 0.5$ , для видикона 0.65—0.7.

Оценим точность регистрации входного светового потока по выходному сигналу. Следует иметь в виду, что для указанных передающих трубок величина шумов не зависит от сигнала и поэтому точность оценки сигнала увеличивается пропорционально величине сигнала. На рис. 1 дана кривая зависимости точности оценки входного светового потока  $\frac{F}{\Delta F}$  от входного светового потока  $F$ .

Из графика видно, что точность оценки входного светового потока растет с увеличением последнего до тех пор, пока участок характеристики не приобретет характер соответствующую логарифмической кривой. В этой точке имеет место максимум, после которого точность оценки падает. Для исправления характеристик передачи в телевидении служит  $\gamma$ -коррекция. Известно, однако, что  $\gamma$ -коррекция не может улучшить отношение сигнал/шум, а может лишь сделать видимыми те градации, различимость которых ограничивалась контрастной чувствительностью глаза. Сложная  $\gamma$ -коррекция может быть использована для такого перераспределения градаций, чтобы их различимость была максимальной для данного регистрирующего устройства.

В фотографии пользуются характеристикой «свет—сигнал» в телевидении. Действительно, если под сигналом понимать усиленную величину непосредственной реакции на действие света, то таковой являются количество перекрывающихся почерневших зерен в рассматриваемом элементе и относительная непрозрачная площадь. Следовательно, сигнал можно оценивать по доле падающего светового потока, поглощенного проявленными зернами, которая составит величину

$$\frac{F_0 - F}{F_0} = 1 - T.$$

Аналогичная сигналу в телевидении величина сигнала в фотографии

$$R = k \frac{F_0 - F}{F_0} = k \frac{s_n}{s_a} = k \frac{m}{M}, \quad (3)$$

где  $s_a$  — площадь сканируемого элемента;  $s_n$  — площадь проекций проявленных зерен;  $m$  — число проявленных зерен;  $M$  — полное число зерен.

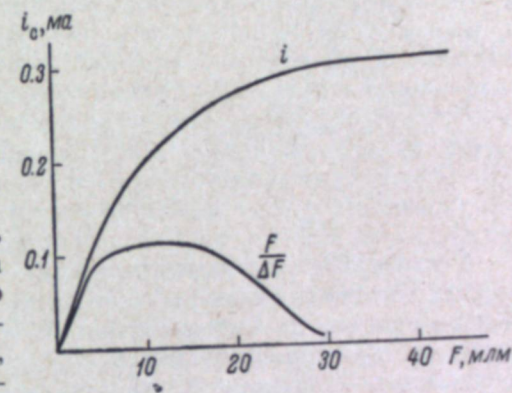


Рис. 1.

Эта величина связана некоторой зависимостью с количеством падающего света, и характер ее нелинейности мог бы быть оценен выражением

$$\gamma = \frac{\lg R_2 - \lg R_1}{\lg F_2 - \lg F_1}$$

Сравнение характеристик «свет—сигнал» и характеристической кривой может быть сделано по рис. 2. Следует иметь в виду, что величина  $D$  находится из тех же данных, что и  $R$ , и между ними существует однозначная связь. Однако в отличие от величины  $R$ , линейно связанной с величиной, являющейся реакцией на действие света и непосредственно измеряемой при фотометрировании,  $D$  сложным образом зависит от измеряемых величин. Из сравнения кривых, построенных для фотопластинок Астро фирмы Агфа видно, что участок, являющийся линейным для сигнала, существенно нелинейен для оптической плотности, а участок, где  $D$  линейно, соответствует участку, в котором величина  $R$  подходит к насыщению.

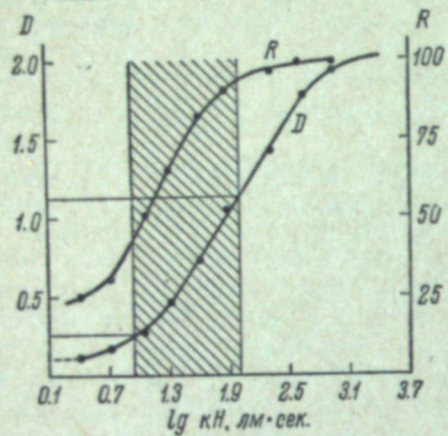


Рис. 2.

Рассматривая преимущества и недостатки этих двух характеристик, обратим внимание прежде всего на практически полную неприемлемость использования характеристической кривой в телевидении. Линейному участку характеристической кривой соответствовал бы участок характеристики «свет—сигнал», который не только нелинейен, но и мало пригоден для работы, так как в этом участке теряется значительная часть информации. Следовательно, при совместной работе телевизионных и фотографических систем более удобно оценивать обе системы характеристиками «свет—сигнал».

В фотографии характеристические кривые используются весьма широко, поэтому возможность отказа от них должна быть изучена тщательно. Следует отметить, что вследствие особенностей изменения шумов (величины  $\sigma_m$ ) в фотографии отношение сигнал/шум у фотографических материалов растет не так, как в телевидении (линейно), а более значительно при больших значениях сигнала в соответствии с выражением

$$\psi = \frac{m}{\sigma_m} = \sqrt{\frac{mM}{M-m}}$$

Соответственно максимум точности оценки величины входной энергии сдвигается в сторону больших количеств света, а следовательно, и больших сигналов и оптических плотностей. Поэтому рабочим участком характери-

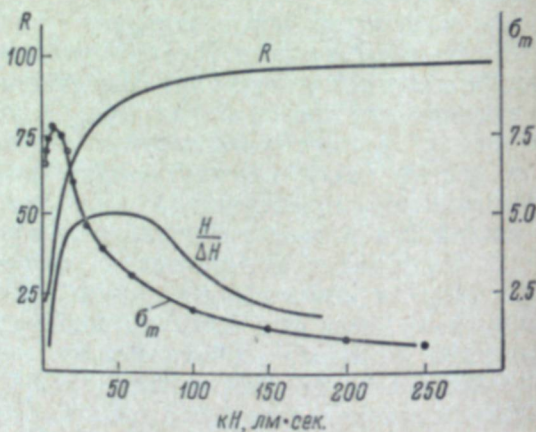


Рис. 3.

стики является участок, захватывающий большой диапазон оптической плотности (рис. 2). На рис. 3 приведена зависимость величины  $\frac{H}{\Delta H}$  от экспозиции  $H$ , полученная из экспериментальных данных по шумам и характеристической кривой. Из рис. 2 и 3 видно, что как в случае характеристики «свет—сигнал», так и в случае характеристической кривой рабочие участки характеристик соответствуют и линейным, и нелинейным участкам. Однако значительная часть линейного участка характеристической кривой оказывается нерабочей. Приведенные соображения говорят в пользу желательности использования в фотографии характеристики, аналогичной характеристике «свет—сигнал» в телевидении.

### О возможности информационной оценки точности воспроизведения в телевидении и фотографии

Со времени выхода в свет известной работы Шеннона [10] теория информации использовалась сравнительно широко сперва только в теории связи. В последнее время область применения теории информации значительно расширилась и, в частности, появилось уже значительное число работ, посвященных применению теории информации для характеристики систем воспроизведения [8, 9, 11—13]. На происходившем в Лондоне в декабре 1960 г. симпозиуме по предельной чувствительности фотографических материалов в некоторых сообщениях [9] делались попытки оценить качество воспроизведения фотографического изображения путем подсчета количества информации, передаваемой этими системами.

Заметим, что количество информации  $I_{в.}$ , передаваемое в процессе воспроизведения, может быть оценено разностью энтропий входного изображения до осуществления процесса воспроизведения  $H_{арр}$  и после него  $H_{арс}$

$$I_{в.} = H_{арр} - H_{арс}. \quad (4)$$

Здесь  $H = -\sum_{i=1}^m p_i \lg p_i$ , где  $p_i$  — вероятность появления данной ступени энергии.

Если энтропия входного изображения, оцененная при условии, что процесс воспроизведения уже осуществлен, оказалась равной нулю, то это означает, что получена информация о входном изображении  $I_{ид.} = H_{арр} = I_0$ , а сам процесс воспроизведения осуществлялся способом, идеальным для решения данного круга задач. В общем же случае энтропия входного изображения после получения выходного равна количеству информации о входном изображении, потерянной воспроизводящей системой в результате ее неидеальности, т. е.

$$H_{арс} = H_{арр} - I_{в.} = I_0 - I_{в.} = \Delta I. \quad (5)$$

Величины количества информации о входном изображении  $I_{в.}$  и энтропии  $H_{арс}$  входного изображения после получения выходного могут быть использованы для единой объективной количественной оценки точности воспроизведения в телевидении и фотографии. Действительно, точность воспроизведения может быть охарактеризована степенью соответствия выходного изображения входному. Очевидно, что соответствие будет тем большим, чем меньше энтропия  $H_{арс}$ . Точность воспроизведения оказывается наивысшей при полной определенности входного изображения, если последняя создается после получения выходного изображения. При этом энтропия  $H_{арс} = 0$ .

Условимся максимальную точность воспроизведения  $Q_{\max}$  обозначать коэффициентом, равным единице. При этом точность воспроизведения  $Q$  выражается формулой

$$Q = 1 - \frac{H_{aps}}{H_{apr}} = \frac{I_v}{I_0}. \quad (6)$$

Величина  $Q$  меняется от единицы при  $H_{aps} = 0$  (максимальная точность воспроизведения) до нуля при  $H_{aps} = H_{apr}$ , когда неопределенность входного изображения после выходного остается такой же, как и до получения его, и, следовательно, выходное изображение не принесло никакой информации о входном (точность воспроизведения при этом наименьшая).

Учитывая, что  $I_v = \nu z_x z_y n \lg_2(m+1)$ , а  $I_0 = \nu_0 z_{x0} z_{y0} n_0 \lg_2(m_0+1)$ , получим

$$Q = \frac{\nu}{\nu_0} \cdot \frac{z_x}{z_{x0}} \cdot \frac{z_y}{z_{y0}} \cdot \frac{n}{n_0} \cdot \frac{\lg_2(m+1)}{\lg_2(m_0+1)}, \quad (7)$$

где  $\nu$  — число спектральных интервалов;  $z_x$  и  $z_y$  — число элементов в строке;  $n$  — число кадров;  $m$  — число ступеней энергии. Величины  $\nu$ ,  $z_x$ ,  $z_y$  и  $n$  при соответствующих оговорках о способе их оценки могут характеризовать качественные показатели:  $\nu$  — спектроразличимость,  $z_x$  и  $z_y$  — разрешающую способность в направлениях  $x$  и  $y$ ,  $n$  — разрешающую способность во времени,  $m$  — количество различимых градаций энергии.

С другой стороны, при равенствах  $z_x = z_{x0}$ ,  $z_y = z_{y0}$ ,  $n = n_0$ ,  $m = m_0$  можно написать, что  $I_v = \frac{\nu}{\nu_0} I_0 = I_{v, \nu}$ , и точность воспроизведения, характеризующая только передачу информации о спектральном составе излучения, выразится следующим образом:

$$Q_\nu = q_\nu = \frac{I_{v, \nu}}{I_0} = \frac{\nu}{\nu_0}.$$

Точно так же можно определить и коэффициенты, характеризующие точность воспроизведения, касающуюся передачи только информации о пространственном или временном распределении энергии ( $m=1$ ) или различения только  $m$  градаций энергии. При этом

$$q_{z_x} = \frac{I_{v, z_x}}{I_0} = \frac{z_x}{z_{x0}}, \quad q_{z_y} = \frac{I_{v, z_y}}{I_0} = \frac{z_y}{z_{y0}}, \quad q_n = \frac{I_{v, n}}{I_0} = \frac{n}{n_0},$$

$$q_m = \frac{I_{v, m}}{I_0} = \frac{\lg_2(m+1)}{\lg_2(m_0+1)}$$

и тогда

$$Q = q_\nu q_{z_x} q_{z_y} q_n q_m. \quad (8)$$

Значения этих коэффициентов могут быть получены в результате проведения измерений, и задача количественной оценки точности изображения в рассматриваемом случае сводится к созданию методик соответствующих измерений.

#### Оценка чувствительности телевизионных и фотографических систем

Применяемые в фотографии и телевидении оценки чувствительности существенно различны. В телевидении чувствительность определяется как величина, обратно пропорциональная освещенности, при которой

создается заданное отношение сигнал/шум телевизионной системы. В фотографии чувствительность определяется величиной, обратно пропорциональной экспозиции, при которой создается оптическая плотность почернения, равная 0.2 сверх плотности вуали. Оба эти определения и вытекающие из них оценки не являются вполне удовлетворительными. Удовлетворительная система оценок чувствительности, общая для обеих систем воспроизведения, может быть создана на базе информационной оценки точности воспроизведения. В частности, чувствительность может быть оценена величиной, обратной входной энергии, при которой достигается получение заданного количества информации. Необходимо заметить, что с точки зрения затрачиваемой энергии безразлично, каким образом получается информация: за счет увеличения числа градаций или за счет увеличения количества элементов в изображении. Для идеальной системы чувствительность  $G$  определяется следующим выражением:

$$G_{ид.} = \frac{1}{W_{вд.}} = \frac{1}{W_1} \cdot \frac{\lg_2(m+1)}{m} \cdot \frac{1}{I_{кр.}}. \quad (9)$$

Здесь  $I_{кр.} = N_{кр.} \lg_2(m_{кр.} + 1)$ , где  $N$  — число элементов.

Более удобно сравнивать между собой системы по чувствительности, если ввести так называемую удельную чувствительность, представляющую собой величину, обратную величине энергии, приходящейся на единицу информации [14].

Для реальных телевизионных и фотографических систем выражение, характеризующее удельную чувствительность  $g$ , может быть представлено в виде

$$g = \frac{1}{\frac{W_{вх.}}{I_{вх.}}} = \frac{N_{вх.} \lg_2(m_{вх.} + 1)}{W_{вх.}}. \quad (10)$$

В телевидении при условии выполнения соотношения (1)  $\psi_{вх.} = A' \sqrt{W_{вх.}}$  и  $m_{вх.} = A' \sqrt{\frac{2W_{вх.}}{k^2 h \nu}}$ ; при этом

$$g_T \cong \frac{N_{вх.} \lg_2 A W_{вх.}^{1/2}}{W_{вх.}}. \quad (11)$$

Наиболее часто, однако, выполняется условие (2);  $\psi_{вх.} = B W_{вх.}$  или  $m_{вх.} = B W_{вх.}$ . Тогда

$$g_T \cong \frac{N_{вх.} \lg_2 B W_{вх.}}{W_{вх.}}. \quad (12)$$

Для расчета удельной чувствительности здесь, кроме величин  $W_{вх.}$  и  $N_{вх.}$ , надо знать величины коэффициентов  $A$  и  $B$ . Более удобно поэтому при выполнении условия (2) пользоваться соотношением

$$g_T = \frac{N_{вх.} \lg_2 \frac{\psi_{вх.}}{k}}{W_{вх.}}, \quad (13)$$

которое получается с учетом выражения  $m_{вх.} = \frac{\psi_{вх.}}{k}$ , где  $k$  — коэффициент, характеризующий надежность измерения.

Для фотографических систем  $\psi_{\text{вых.}} = \sqrt{\frac{mM}{M-m}}$  и так как  $m_{\text{вых.}} = \frac{\sqrt{2}\psi_{\text{вых.}}}{k}$ , то

$$g_{\phi.} = \frac{N_{\text{вых.}} \lg_2 \frac{\sqrt{2}}{k} \sqrt{\frac{mM}{M-m}}}{W_{\text{вых.}}} \quad (14)$$

Приведенные выражения получены для случаев, когда отношение сигнал/шум не зависит от близости расположения деталей. В действительности существует множество необратимых процессов, таких, как рассеяние света, утечка зарядов и т. п., которые приводят к уменьшению величины  $\psi_{\text{вых.}}$  с увеличением числа  $N_{\text{вых.}}$ . В этих случаях необходимо подсчитать среднюю величину  $\lg_2 m_{\text{вых.}}$  для всех значений  $N_{\text{вых.}}$ . Нетрудно видеть, что

$$\overline{\lg_2 m_{\text{вых.}}} = \frac{1}{N_{\text{вых.}0}} \int_0^{N_{\text{вых.}}} \lg_2 m_{\text{вых.}}(N) dN = \frac{1}{N_{\text{вых.}0}} \int_0^{N_{\text{вых.}}} \lg_2 \frac{\psi_{\text{вых.}}(N)}{k} dN,$$

откуда

$$g = \frac{\int_0^{N_{\text{вых.}}} \lg_2 \frac{\psi_{\text{вых.}}(N)}{k} dN}{W_{\text{вх.}}} \quad (15)$$

Соотношение (15) определяет удельную чувствительность телевизионной или фотографической системы в самом общем виде. Для получения величины  $g$  должны быть проведены измерения величины  $W_{\text{вх.}}$  и функции  $\psi_{\text{вых.}}$ , соответствующей апертурной характеристике в телевидении и частотно-градационной — в фотографии (в каждом случае со своим пересчетным коэффициентом).

Для получения функции  $\psi(N)$  не требуется какой-либо специальной методики; необходимо лишь измерить величину отношения сигнал/шум телевизионной или фотографической системы [15] и полученное значение умножить на все ординаты частотно-градационной или апертурной характеристик, нормированных таким образом, чтобы при  $N \rightarrow 0$   $f(N) \rightarrow 1$ .

## Выводы

1. Применяемые в фотографии и телевидении характеристики качества воспроизведения изображения существенно различны. При ближайшем рассмотрении оказывается, что указанные характеристики не обуславливаются свойствами процесса, осуществляющего воспроизведение. И в телевидении, и в фотографии входом и выходом системы являются изображения, поэтому нет серьезных оснований для различного подхода к оценке качества воспроизведения в обеих этих системах.

Единая оценка качества воспроизведения необходима для согласования фотографической и телевизионной систем при их совместном использовании, а также для выбора той из этих двух систем, которая наилучшим образом удовлетворяла бы поставленным требованиям.

2. Примерами различного подхода к одним и тем же качественным характеристикам в телевидении и фотографии являются оценка числа различимых градаций и отношения сигнал/шум, оценка разрешающей способности и характеристики нелинейности системы. В качестве единых характеристик в одних случаях за основу могут быть приняты телевизион-

ные характеристики (шумы и нелинейность системы), в других — фотографические (разрешающая способность).

3. Общая единая оценка точности воспроизведения может быть получена на базе представлений, развиваемых теорией информации. Более высококачественной системой является та, которая осуществляет воспроизведение изображения с меньшими потерями информации.

4. Существующие оценки чувствительности в телевидении и фотографии не только существенно различны, но и недостаточны, так как они не связывают чувствительность с количеством переданной информации. Следует использовать информационную систему оценок чувствительности, единую для телевидения и фотографии. Различные устройства могут сравниваться с помощью так называемой удельной чувствительности, представляющей собой величину, обратно пропорциональную количеству входной энергии излучения, приходящейся на единицу количества информации, переданного на выход телевизионной или фотографической системы. Практическое применение такой системы оценок не требует специальной подготовки и может быть осуществлено на базе соответствующих измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Халфин. Основы телевизионной техники. Изд. «Сов. радио», М., 1955.
2. Г. В. Брауде. Труды секции телевидения. Изд. ВНТОРЭ им. А. С. Попова, М., 1948.
3. В. К. Зворыкин, Д. А. Мортон. Телевидение. ИЛ, М., 1956.
4. L. H. Bedford, Proc. IEE, 99, р. IIIA, 17, 82—88, 1952.
5. С. Б. Гуревич, Радиотехника и электроника, 6, 982—992, 1961.
6. К. Миз. Теория фотографического процесса. ГТТИ, М., 1949.
7. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. fotogr., I, 86, 1951.
8. H. J. Zweig, G. C. Higgins, D. L. Mac Adam, J. Opt. Soc. Amer., 48, 926, 1958.
9. W. F. Berg, Phot. J., 101, 61, 1961.
10. К. Шеннон. Статистическая теория передачи электрических сигналов. В сб.: Теория передачи электрических сигналов при наличии помех, ИЛ, М., 7—87, 1953.
11. E. H. Linfoot, J. Phot. Sci., 7, 148, 1959.
12. R. C. Jones, J. Opt. Soc. Amer., 50, 1168, 1960.
13. С. Б. Гуревич, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 133, 1962.
14. С. Б. Гуревич, Радиотехника и электроника, 6, 1165, 1961.
15. И. И. Брейдо, Г. А. Гаврилов, С. Б. Гуревич, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 306, 1962.

В. А. МАХОНИН

### ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ РЕЗКОСТИ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В телевидении применяют устройства для повышения резкости изображений, нерезкость которых обусловлена конечными размерами электронного луча передающей трубки. Эти устройства, так называемые апертурные корректоры, основаны на применении линейных электрических преобразователей видеосигнала, импульсная реакция которых, кроме положительных, принимает также и отрицательные значения.

Для осуществления таких преобразований чисто оптическим путем пришлось бы использовать интерференционную технику при освещении когерентным источником света.

С помощью апертурных корректоров можно компенсировать не только искажения, вносимые телевизионными трубками. Так, известно, например, что некоторая перекоррекция телевизионного тракта приводит к улучшению качества изображения. Это происходит из-за коррекции характеристик глаза. Пространственное суммирование в зрении приводит к искажениям типа рассеяния, в частности, к зависимости порога контрастной чувствительности глаза от размеров равномерного кругового испытательного поля на равномерно освещенном фоне. Зависимость порога  $\epsilon$  контрастной чувствительности от угловых размеров поля  $\gamma$  позволяет для яркостей фона из телевизионного диапазона яркостей (1—50 нт) определить значения коэффициентов матрицы рассеивания, эквивалентной по рассеивающим свойствам зрительному анализатору. Угловое разрешение элементов матрицы (рис. 1) принимается равным  $1'$ , т. е. соответствующим одному элементу телевизионного раstra.

Вычисление проводится при предположении, что пороги дискретизирующих ячеек, соединенных с выходами рассеивающей матрицы, равны между собой, составляя  $\Delta$ .

Тогда при увеличении контраста поля срабатывает ячейка, соответствующая центру; при этом  $\Delta = 2\pi\epsilon(\gamma) \int_0^{\frac{\gamma}{2}} w(\gamma) d\gamma$ . Отсюда  $w(p) = \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{d}{d\gamma} \left( \frac{1}{\epsilon(\gamma)} \right)$ , где  $p = \frac{\gamma}{2}$ . Это дает следующие относительные значения для коэффициентов в зависимости от расстояния в элементах изображения:

$$\begin{aligned} w(0) &= 1 & w(2) &= 0.055 \\ w(1) &= 0.175 & w(3 \text{ и далее}) &< 0.02. \end{aligned}$$

Значения коэффициентов веса корректора просчитаны для изотропного точечного раstra с шестиугольной решеткой и для обычного анизотропного строчного раstra. Они устанавливаются такими, чтобы воздействие на один вход корректора передавалось только на один соответствующий выход матрицы рассеяния.

Получены следующие относительные значения весовых коэффициентов матрицы корректора:

Изотропный точечный растр	Строка обычного раstra
$w(0) = 1$	$\psi(0) = 1$
$w(1) = -0.11$	$\psi(1) = -0.157$
$w(2) = -0.02$	$\psi(2) = -0.026$
$w(n) \cong 0$	$\psi(n) \cong 0$
$n \geq 3$	$n \geq 3$

Таким образом, удалось определить характеристики линейного корректора для глаза, т. е. те предыскажения видеосигнала в апертурном корректирующем устройстве, которые обеспечивают лучшее зрительное качество изображения. С помощью линейных корректирующих устройств можно компенсировать и искажения типа рассеяния, имевшие место при образовании фотографического изображения. Линейные корректирующие устройства совместно с телевизионными установками позволяют повысить контраст и резкость мелких деталей и границ до пределов, обусловленных разрешающей способностью той оптической системы, которая была использована при фотографировании.

Из электронных устройств для улучшения фотографического изображения в последнее время приобрели популярность устройства с электроннолучевой трубкой для автоматической печати по методу нерезкой маски. Применение этих устройств снимает необходимость в изготовлении нерезкой маски и ее совмещении с негативом.

Нерезкую маску заменяет изображение, проецирующееся на негатив с экрана электронно-лучевой трубки, включенной по схеме «бегущего луча» с обычным телевизионным растром. Это изображение образуется с помощью сигналов обратной связи, поступающих через усилитель на управляющий электрод трубки с фотоэлемента, помещенного за негативом. Размер пятна берется в соответствии с желаемой степенью нерезкости маски, коэффициент усиления и амплитудную характеристику усилителя — соответственно нужно сокращению диапазона плотностей негатива и распределению контраста деталей для участков разной плотности.

При большом коэффициенте усиления такое устройство работает как линейный фильтр, пропускающий только верхние пространственные частоты негативного изображения. В этом режиме оно выделяет контурные

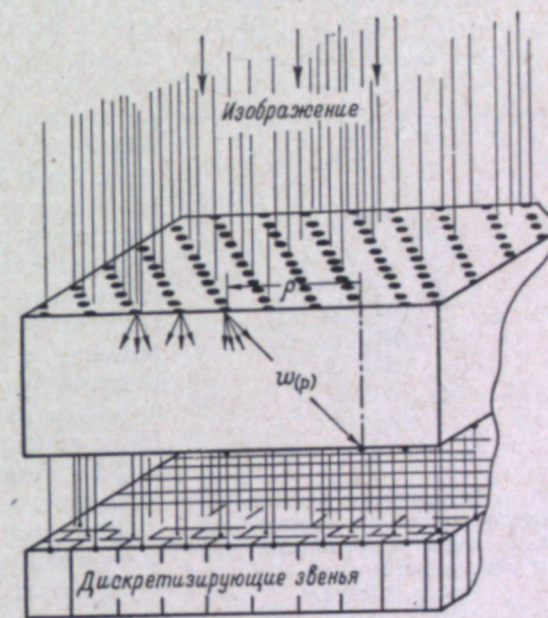


Рис. 1. Модель зрения при определении характеристик апертурного корректора для глаза.

всплески и производит окантовку мелких деталей, не уменьшая, однако, зоны размытости, которая остается той же, что и на негативе, и по-прежнему определяется разрешением объектива.

Тем не менее печатающие устройства типа автоматической нерезкой маски повышают визуальную резкость, так как приводят к увеличению контраста на границах и в мелких деталях, а выбросы, сопровождающие это увеличение, производят приближенную апертурную коррекцию глаза.

Применение телевизионных корректоров для повышения разрешающей способности фотооптических систем связано с очень большими трудностями.

Прежде всего частотные характеристики объективов очень близки к характеристикам идеального фильтра нижних пространственных частот. Поэтому даже при неизменной и точно определенной характеристике объектива такая коррекция требует очень большого усиления для верхних пространственных частот, что ограничивается большим уровнем флуктуационных шумов передающей трубки. С другой стороны, характеристики объектива меняются с изменением цвета объектов, данные о котором не содержатся в черно-белом негативе, и эти изменения приходится рассматривать как случайные помехи. Наконец, возможности повышения разрешения ограничиваются зернистой структурой материала, квантовой природой света и другими случайными воздействиями на изображение в фотографическом процессе. В то же время нелинейные телевизионные преобразователи позволяют уменьшить зону размытости объектов, представленных на негативе, до любой желаемой величины, производить выделение и подчеркивание основных информационных элементов изображения и ряд других операций.

С целью экспериментального исследования эффективности различных способов выделения информационных элементов изображения в Институте проблем передачи информации Академии наук СССР был построен лабораторный макет изотропного нелинейного преобразователя изображений.

Это устройство осуществляет взаимное вращение изображения и телевизионного раstra. Оно собрано на базе типовой промышленной телевизионной установки типа ПТУ1-ОМ и, кроме передающей и приемной камер, включает в себя магазин переходных характеристик, два быстродействующих амплитудных дискриминатора, устройства для выделения импульсов из заданного диапазона длительности и простейшие логические схемы.

Вращение раstra позволяет осуществить линейно-радиальную развертку круглой окрестности каждой точки изображения (рис. 2). Яркость точки преобразованного изображения при каждом угловом положении раstra определяется содержанием ее окрестности вдоль строки раstra в исходном изображении.

Регистрация преобразованного изображения и накопление результатов преобразования от разных углов производится с помощью фотографического материала.

Проведенные нами эксперименты показали, что описанное устройство позволяет набирать широкий класс преобразований, в том числе выделение деталей изображения, в окрестности которых нет других деталей того же размера, выделение угловых точек контурных изображений, восстановление распавшихся изображений и др.

## Вывод

Телевизионные преобразователи изображений можно использовать для повышения резкости фотографических изображений одновременно с апертурной коррекцией для глаза.

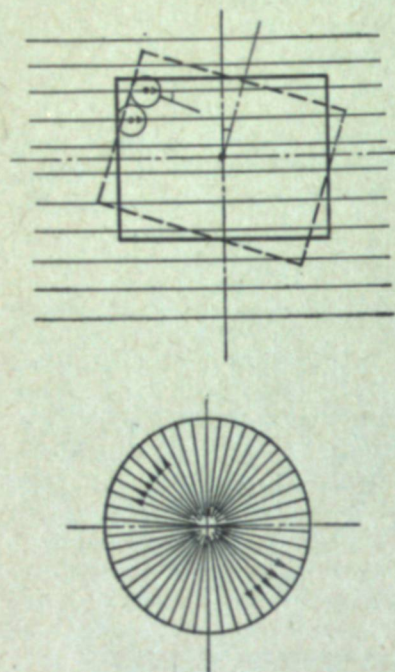


Рис. 2. Образование линейно-радиальной развертки окрестности любой точки изображения при вращении его относительно строчного раstra.

А. М. ХАЛФИН

## ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КОНТРАСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР

(АВТОРЕФЕРАТ)

Предельная контрастная чувствительность телевизионных камер ограничивается только флуктуационными помехами, возникающими при образовании сигнала. Минимально обнаруживаемый контраст изображения на фотокатоде передающей трубки (порог контрастной чувствительности) есть

$$k_{\text{т.}} = \frac{x}{\psi_{\text{max}}},$$

где  $\psi_{\text{max}}$  — максимальное отношение сигнал/шум;  $x$  — «пикфактор» помех, показывающий, во сколько раз разность сигналов от объекта и фона должна превышать среднеквадратичное значение шума, чтобы вероятность обнаружения  $P_{\text{об.}}$  была достаточно велика.

Случайные флуктуации могут быть приняты за объект. Величина  $x$  должна быть выбрана так, чтобы вероятность такого ложного обнаружения  $P_{\text{л.}}$  была достаточно мала.

Для точечного объекта, положение которого на фоне, состоящем из большого числа элементов  $N$ , заранее неизвестно, получено общее решение для  $x$  в зависимости от  $P_{\text{об.}}$  и  $P_{\text{л.}}$ . При  $N = 5 \cdot 10^5$ ,  $P_{\text{об.}} = 0.99$  и  $P_{\text{л.}} = 0.01$ , расчет дает значение  $x = 7.8$ . Если положение точечного объекта известно, то  $x = 4.8$ . Если форма и ориентация объекта, состоящего из  $N_0$  элементов, известны, то усреднение флуктуаций по поверхности изображения объекта и усреднение  $n_0$  последовательных кадров уменьшает величину  $x$  в  $\frac{1}{\sqrt{n_0}} \sqrt{\frac{1}{N_0} + \frac{1}{N_{\text{ф.}}}}$  раз, где  $N_{\text{ф.}} = N - N_0$  — число элементов на фоне.

Потенциальная возможность уменьшения порога  $k_{\text{т.}}$  для «идеальной» передающей трубки, в которой единственным источником помех является дробовый эффект эмиссии фотокатода, а характеристики камеры линейны, определяется выражением

$$k_{\text{т.}} = \frac{x \sqrt{e}}{l \sqrt{e E_{\text{max}} t}},$$

где  $e$  — заряд электрона;  $l$  — линейный размер одного элемента на фотокатоде;  $E_{\text{max}}$  — освещенность изображения наиболее яркого участка;

$\epsilon$  — приведенная интегральная чувствительность фотокатода;  $t$  — время накопления.

Расчеты показывают, что  $k_{\text{т.}}$  могло бы быть много меньше порога контрастной чувствительности зрения. К сожалению, реальные передающие трубки имеют нелинейные характеристики и отношение максимального значения полезного сигнала к эффективному значению шума с ростом освещенности достигает предельной величины порядка  $10^2$ . Но уже теперь  $k_{\text{т.}}$  для крупных объектов может быть сделано ниже порога контрастной чувствительности зрения.



#### IV. ИНЫЕ ВИДЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. В. ЛУИЗОВ

##### ИЗОБРАЖЕНИЕ НА СЕТЧАТКЕ И ЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Зрительный процесс начинается с того, что на сетчатке появляется проекция тех предметов, на которые направлен глаз. Каковы бы ни были дальнейшие преобразования энергии в зрительной системе, воспринимаемая сознанием картина должна, очевидно, зависеть от качества этого начального светового изображения. Между тем глаз как оптическая система далеко не совершенен. Известно, что Гельмгольц сказал: «Если бы оптик пытался продать мне инструмент, в котором оказались бы недостатки, присущие глазу, то я считал бы себя вправе высказать ему в самых резких выражениях порицание за такую небрежную работу и вернуть ему инструмент с протестом».

Правда, А. И. Тудоровский более благоприятно отзываясь о глазе, считая, что для системы исключительно широкоугольной он достаточно хорошо исправлен. Но попробуем от общих оценок — хороша или плоха система — перейти к конкретным данным.

Прежде всего любого специалиста по оптическим системам удивляет то, что глаз — не центрированная система. В глазу по крайней мере 8 преломляющих поверхностей. Три из них разделяют среды с довольно значительным различием в показателях преломления (передняя поверхность роговицы и две поверхности хрусталика). Все они несферические и даже не поверхности вращения, так что ось каждой из них можно определить только приблизительно. Между собой эти оси не совпадают, составляя углы до 2—3°. Если все же как-то установить некоторую среднюю оптическую ось, то окажется, что она не совпадает со зрительной осью, т. е. с той линией, на которой лежит точка фиксации глаза, изображающаяся в центре фовеа. Угол между оптической и зрительной осями составляет примерно 5°.

Аберрации глаза довольно велики. По данным А. Иванова [6], при диаметре зрачка 2—4 мм каждая из этих аберраций равна примерно одной диоптрии. Меньшие зрачки не улучшили бы положения, так как стала бы сильно проявляться дифракция. Диаметр кружка рассеяния  $d$ , зависящий от дифракции, определяется формулой

$$d = 2.44 \frac{\lambda f}{D},$$

где  $\lambda$  — длина волны света;  $D$  — диаметр зрачка;  $f$  — фокусное расстояние глаза.

В таблице сведены данные об основных причинах, размывающих изображение светящейся точки в центре фовеа. Здесь  $A$  — аберрация;  $d$  и  $\alpha$  — диаметр кружка рассеяния, в микронах и в угловых минутах.

$D$ , мм	Причина порчи изображения	$A$ , диоптр.	$d$ , мк	$\alpha$
4	Сферическая аберрация.	1	60	12
	Хроматическая аберрация.	1	60	12
	Дифракция.	—	6	1.2
2.4	»	—	10	2

Приведем также основные данные о структуре сетчатки: диаметр колбочек 3—5 мк, число колбочек 7 млн, число палочек 130 млн и число волокон зрительного нерва, идущих от глаза в мозг, 500—800 тыс.

Эти данные, в особенности данные об аберрациях, действительно могут создать впечатление, что глаз не может обладать хорошей разрешающей силой. Между тем острота зрения, принятая врачами за норму,  $V=1$  соответствует предельному разрешаемому углу  $\delta=1'$ , т. е. линейному размеру изображения на сетчатке  $d=5$  мк. Обычно же острота зрения бывает примерно 1.6, т. е.  $d=3$  мк. В некоторых случаях отмечается еще большая острота зрения. Так, например, беря отсчет по шкале нониуса, человек замечает сдвиг одной черты относительно другой, соответствующий примерно 6'', что дает на сетчатке смещение на 0.5 мк.

Таким образом, глаз фактически работает гораздо лучше, чем можно было бы предположить на основе анализа данных о качестве изображения. Можно сказать, что глаз работает, как хорошо исправленная система, разрешающая способность которой лимитируется уже не аберрациями, а природой света (дифракцией). Следовательно, у глаза существуют какие-то свои особые методы коррекции. Отчасти такая коррекция производится на самой сетчатке. Колбочки имеют форму волноводов, устроенных таким образом, что сильнее всего действуют на них лучи, идущие по оси колбочек. Лучи, падающие под большим углом к оси, т. е. идущие через периферические зоны зрачка, воздействуют на колбочку слабее (эффект Стайлса—Кроуфорда). Действие хроматической аберрации значительно ослабляется тем, что спектральная чувствительность сетчатки носит ярко выраженный избирательный характер: наибольшая для длины волны 555 мкм чувствительность быстро падает и для более длинных, и для более коротких волн.

Но все же только двумя вышеуказанными причинами нельзя объяснить высокую разрешающую способность глаза.

Если аберрации весьма велики близ оси глаза, то они должны быть еще значительно больше на периферии сетчатки. Это действительно так. Но и острота зрения быстро падает от центра к периферии сетчатки, что можно видеть из данных Н. И. Пинегина и Н. П. Травниковой:

$\varphi$ . . . . .	0	5	10	15	20	25	30
$V$ . . . . .	1.6	1.2	0.8	0.66	0.55	0.44	0.35

Здесь  $\varphi$  — угол между зрительной осью и направлением на тест-объект, в градусах;  $V$  — острота зрения.

Уменьшению остроты зрения на периферии соответствует огрубление структуры сетчатки. Колбочки имеют наименьший диаметр в центре фовеа. Кроме того, каждая фовеальная колбочка связана с отдельным нервным волокном. При удалении от фовеа в сетчатке начинают преобладать палочки, которые целыми кустами соединяются с одним нервным волокном. Число светочувствительных элементов сетчатки достигает около 140 млн, но нервных волокон меньше миллиона. Значит, зрительное изображение, передаваемое в мозг, разлагается только на 500—800 тыс. элементов. Правда, изображение на экране телевизора разлагается тоже на

500 тыс. элементов. Но ведь экран занимает только небольшую часть поля зрения. А поле зрения глаза исключительно велико. Угол между зрительной осью и крайним лучом, входящим в глаз, различен для разных меридианов. Он доходит до  $95^\circ$ , а в среднем составляет примерно  $75^\circ$ . Для такого поля зрения полмиллиона элементов как будто мало.

Вот тут мы подходим к тому, что в некоторой степени может объяснить отмеченные нами противоречия: глаз чрезвычайно подвижен. Мы плохо различаем то, что находится на периферии поля зрения, но почти не ощущаем этого недостатка. Ведь как только какой-нибудь периферически видимый предмет привлечет наше внимание, мы сразу поворачиваем к нему глаза и он становится видимым отчетливо. По-видимому, одинаковая по всему полю острота зрения вообще не принесла бы нам пользы: все равно мы не смогли бы сосредоточить внимание на всех одновременно видимых деталях, число которых стало бы огромным.

Но оказывается, что и в том случае, когда мы непрерывно смотрим на один предмет или даже на одну точку предмета, глаза не остаются неподвижными. Когда человек думает, что глаза его совершенно неподвижны, они на самом деле совершают ряд сложных и разнообразных движений, которые можно разделить на три вида:

1) тремор — колебания глаз с амплитудой порядка одной угловой минуты и с частотами от 30 до 80 сек.<sup>-1</sup>;

2) дрейф — медленное, плавное смещение глаз со скоростью около одной угловой минуты в секунду; смещение при дрейфе доходит до пяти угловых минут и более;

3) скачки — быстрые движения глаз обычно в направлении, обратном дрейфу; амплитуда скачка от 1 до 20', длительность скачка 0.025 сек., время между скачками от 0.03 до 5 сек.

Движения глаз приводит к тому, что глаза как бы непрерывно «ощупывают» находящуюся перед наблюдателем картину. Предположим, что в ней имеется пятно, несколько более темное, чем все поле зрения (фон). При неподвижном взоре две колбочки, лежащие по разные стороны от изображения пятна на сетчатке, должны были бы дать несколько различные сигналы и их сравнение где-то в мозгу дало бы представление о различии яркостей. При движении глаз одна и та же колбочка, попадая то на изображение пятна, то на изображение фона, получает различные световые раздражения и дает сигнал о разнице яркостей по разные стороны от границы изображения пятна. Такой способ сравнения двух яркостей более чувствителен, он может зарегистрировать меньшую разность яркостей, меньший контраст. Конечно, мозг получает сигналы не от одной колбочки, а от ряда колбочек, лежащих близ границы, и, суммируя их информацию, создает представление о положении, величине и форме контрастирующего пятна.

Лет пятнадцать назад зрительный процесс можно было представить примерно так. На сетчатке получается изображение предмета, на который смотрит глаз. Каждый светочувствительный элемент сетчатки (будем дальше иметь в виду колбочки, считая, что речь идет о дневном зрении) оказывается под действием определенной освещенности  $E$ , соответствующей данному месту изображения. От колбочки через нервное волокно в мозг передаются импульсы, частота которых  $n$  зависит от общего состояния адаптации и от освещенности  $E$  на данной колбочке. Зависимость от освещенности — прямая, т. е. чем больше  $E$ , тем больше  $n$ . Есть основания считать, что  $n$  пропорционально логарифму  $E$ . В мозгу по получаемым от всех колбочек сигналам воссоздается распределение освещенности на сетчатке и, следовательно, в той картине, на которую обращен глаз.

Однако более поздние исследования показали, что волокна, непрерывно передающие импульсы под действием постоянной освещенности, хотя и

существуют, но их очень мало. Они одни сами по себе, как мы увидим дальше, не могут обусловить процесс зрения. Преобладают же волокна, реагирующие на изменение освещенности: *on*-волокна, *off*-волокна и *on-off*-волокна. Каждое из этих волокон реагирует группой импульсов: *on*-волокно — на увеличение освещенности, *off*-волокно — на уменьшение освещенности, *on-off*-волокно — и на увеличение, и на уменьшение освещенности. Величина изменения освещенности кодируется частотой возникающих импульсов и их общим числом в группе. Быть может, имеет значение и распределение импульсов во времени, так как интервалы между импульсами в группе неодинаковы, т. е. говорить о постоянной их частоте, в сущности, нельзя. Следует отметить, что в сигнале мы имеем одну переменную величину — число импульсов и одну функцию — распределение этих импульсов во времени. Можно предположить, что числом импульсов кодируется яркость (точнее, изменение яркости), а их распределением во времени — цвет. На основе такого предположения В. П. Козлов построил весьма интересную гипотезу цветового зрения, которая была им изложена в докладе на совещании по физиологии анализаторов (органов чувств) в 1961 г.

Гипотеза Козлова позволяет отказаться не только от предположения, что существует три рода колбочек, но и от необходимости допускать существование трех светочувствительных веществ в колбочках. Достаточно допустить наличие одного вещества с определенной спектральной чувствительностью и с достаточно сильно выраженной зависимостью инерционных свойств от длины волны.

Таким образом, передающая система глаза реагирует в основном на изменение освещенности, работая как дифференцирующее устройство. При этом не обязательно, чтобы в наблюдаемой картине происходили какие-то изменения яркости во времени. Изменения во времени для каждой данной колбочки создаются движениями глаз, если при таких движениях через колбочку проходит граница между различно освещенными областями. Если же освещенность колбочки не меняется, то и сигналов она не посылает.

Возможно, что посылаемый сигнал зависит не только от первой, но и от второй производной освещенности. Существует явление, которое обычно называют полосами Маха. Если две яркости  $B_1$  и  $B_2$  разделены областью, в которой яркость постепенно повышается от  $B_1$  до  $B_2$  (см. рисунок), то глаз видит ( $S$ ) две полосы, идущие по краям области перехода: вблизи малой яркости — еще более темную полосу, вблизи большой — еще более светлую. Полосы Маха относят к числу иллюзий, оптических обманов. Но следует отметить, что такой «обман» помогает заметить реально существующий, но размытый в переходной области контраст между яркостями  $B_1$  и  $B_2$ , что безусловно биологически полезно.

Решающая роль сигналов, связанных с изменением освещенности, экспериментально доказана опытами Дитчборна и Ярбуса. Оба автора стабилизировали изображение на сетчатке, т. е. делали его неподвижным относительно сетчатки. Дитчборн достигал стабилизации с помощью оптической системы, включающей в себя зеркальце на контактной линзе, надетой на глаз. Луч от тест-объекта, прежде чем попасть в глаз, проходил довольно сложный путь, и в частности отражался от зеркальца на контактной линзе. А так как зеркальце двигалось вместе с глазом, можно было осуществить компенсацию смещения изображения на сетчатке.

Ярбус достигал той же цели более простым способом. На роговицу укреплялась присоска с миниатюрной линзой, в фокусе которой помещалось матовое стекло с изображением тест-объекта. Так как после линзы от каждой точки объекта в зрачок попадал пучок параллельных лучей, объект был хорошо виден без аккомодации. Вместе с тем он двигался

вместе с глазом и его изображение на сетчатке не смещалось. Результаты опытов были совершенно однозначны. После включения света испытуемый хорошо видел тест-объект, но видел его только 2—3 сек. Затем объект исчезал и, пока освещение не изменялось, оставался невидимым. Стоило на короткое время выключить свет и затем снова включить его — объект снова становился видимым на 2—3 сек. Изменение освещенности объекта также восстанавливало на короткое время его видимость.

Итак, в реальных условиях наблюдения при неизменном освещении мы видим предметы только за счет движений глаз. Преположим, мы непрерывно фиксируем глаза на большом сером квадрате, видимом на белом фоне. При движениях глаз некоторые колбочки постоянно переходят с белого поля на серое и обратно. Это колбочки, лежащие на границах изображения квадрата. Пограничные колбочки сигнализируют о наличии перепада яркостей, поэтому контур остается непрерывно видимым.

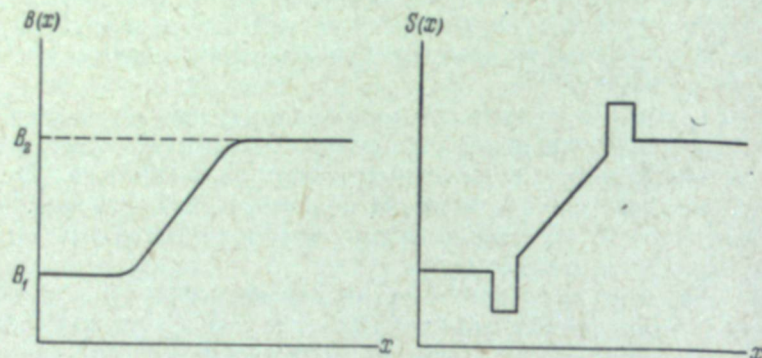


Схема эффекта полос Маха

Но ведь и середину квадрата мы непрерывно видим серой, а любую точку фона — белой, между тем как оттуда никаких сигналов не поступает. Сигналы с этих мест поступили в первый момент, когда мы взглянули на квадрат. В дальнейшем отсутствие сигналов означает, что ничто не меняется. И мы продолжаем видеть то, о чем было просигнализировано в первый момент. Значит, в зрительной системе существует запоминающее устройство, которое в сознании поддерживает неизменным впечатление, создавшееся в первый момент. Сигналы с контуров квадрата подтверждают наличие перепада яркостей на его границах, показывая тем самым, что система работает исправно и запоминающее устройство дает правильную информацию. Однако, если по всему полю зрения нигде ничто не меняется, запоминающее устройство выключается. Но в реальных условиях так никогда не бывает. Ученым пришлось немало потрудиться, чтобы искусственно стабилизировать изображение на сетчатке.

Но в чем смысл такой системы передачи информации? Смысл и преимущества ее очевидны. Когда передаются только сигналы об изменениях, значительно разгружается канал передачи. В нашем примере с серым квадратом десятки тысяч колбочек, на которые падало изображение средних частей квадрата, и десятки тысяч колбочек, на которые падало изображение фона, не передавали никаких сообщений. Десятки тысяч волокон зрительного нерва и десятки тысяч клеток в мозгу были освобождены от бесполезной работы приема сообщений о том, что ничего не произошло.

Замечательно, что многие изобретатели стараются сейчас внедрить этот принцип в технику телевидения [8]. Дело сводится к тому, чтобы не передавать полмиллиона сигналов на каждый кадр, а ограничиться только передачей сигналов об изменениях яркости в тех местах, где они происходят, возложив обязанность воспроизведения неизменяющейся яркости на

запоминающие устройства. Вспомним, что именно чрезмерная нагрузка канала заставляет вести телепередачи на столь высоких частотах. Разгрузка канала открывает перед техникой телевидения весьма заманчивые перспективы.

В зрительной системе человека великолепно организована переработка информации. До сознания доходит то, что существенно и жизненно важно, и исключается то, что только мешает осмыслению увиденного. Мы можем видеть то, чего нет в объекте, но что помогает нам лучше воспринять объект (вспомним полосы Маха!). Мы можем не видеть того, что реально существует, но что помешало бы правильному восприятию. Так, мы не замечаем радужных полос, которые появляются на сетчатке вследствие хроматической аберрации. Глаз обходится без оптической коррекции. Коррекция осуществляется другими средствами, недоступными для чисто оптического прибора. Не видим мы также и темного пятна, соответствующего слепому пятну глаза. Оно незаметно даже тогда, когда мы смотрим только одним глазом.

Для автоматических систем весьма трудной оказывается задача опознавания образа. Зрение легко справляется с такой задачей. Мы сразу узнаем, скажем, букву А, независимо от того, какова ее величина и как она повернута. Нам не кажется, что человек стал меньше ростом, если он отошел от нас на 20 шагов. При движении глаз изображение скользит по сетчатке, однако мы не считаем, что предметы, на которые мы смотрим, движутся. И, пожалуй, самое удивительное то, что мы видим все предметы на тех местах, где они действительно находятся.

До сих пор существуют люди, которые удивляются тому, что мы видим предметы не вверх ногами, несмотря на отсутствие оборачивающей системы в глазу. Но оборачивающая система так же мало полезна глазу, как передающей телевизионной трубке: разве трудно перевернуть изображение в процессе передачи?

Вопрос о перевернутости изображения в глазу волновал многих ученых.

В 1038 г. Ибн Хайтам, по-видимому, впервые упоминает о камере-обскуре. Затем ее вновь изобретает Леонардо да Винчи [7]. Он указывает, что такое же изображение может получиться в глазу. Маврикий (1575 г.) сравнивал хрусталик с линзой, но отрицал перевернутость изображения в глазу, раз мы не видим все перевернутым. Но уже Кеплер (1602 г.) допускал, что изображение в глазу перевернуто. «Опыт и активное вмешательство души — вот что выправляет изображение», — говорил он.

Именно опыт и действие сознания не только выправляют изображение, но и приводят к гораздо более чудесному и удивительному результату: исторгают изображение из недр наших глаз и возвращают его на место предметов, правильное расположение которых вокруг нас мы непосредственно воспринимаем.

Следует сказать, что зрительная система проявляет замечательную гибкость в смысле способности объединять или, наоборот, разъединять отдельные рецепторы. Так, например, при высокой яркости фона, когда нужно и возможно различать отдельные объекты большого контраста, но малых угловых размеров, каждая фовеальная колбочка действует, очевидно, отдельно. Но уже при различении минимального сдвига штрихов на шкале нониуса помогает кооперация многих колбочек, расположенных вдоль штрихов. Еще яснее проявляется объединение колбочек при понижении яркости или при уменьшении контраста.

Известно, например, что даже при большой яркости мы не видим кружка, контраст которого с фоном равен 0.03, если диаметр кружка составляет  $1'$ . Но при диаметре  $30'$  кружок будет виден. Значит, колбочки, размер каждой из которых не более  $1'$ , как-то объединяются, чтобы вос-

принять малый контраст, не воспринимаемый каждой из них. А почему одна колбочка не может воспринять малый контраст? Потому что за время сохранения зрительного впечатления на нее падает слишком малое число световых квантов и относительные флуктуации этого числа больше подлежащего восприятию контраста. Контраст тонет во флуктуациях, сигнал заглушается шумом. А на площадь в 30' падает в 900 раз больше квантов и относительные флуктуации уменьшаются в 30 раз. Теперь сигнал уже преобладает над шумом.

Нечто подобное происходит и при понижении уровня освещенности. Число квантов, рассматриваемых окружающими предметами, уменьшается, и глаз реагирует на это несколькими способами: 1) расширением зрачка; 2) увеличением концентрации светочувствительных веществ и (в случае сильного понижения освещенности) переходом от колбочкового (дневного) зрения к палочковому (сумеречному); 3) увеличением времени инерции, и 4) расширением площади, по которой происходит суммирование световых раздражений.

Последнее приводит к понижению остроты зрения. И все же нужно признать такое понижение не просто недостатком зрения, а его способностью рационально приспособляться к трудным условиям слабого освещения.

Нами была выведена формула [11], связывающая остроту зрения с контрастом объекта с фоном и с яркостью фона,

$$\delta = \frac{a \sqrt{n_0}}{Dk \sqrt{\vartheta} p_1 B},$$

где  $\delta$  — предельный угол, рад.;  $D$  — диаметр зрачка глаза, см;  $k$  — контраст;  $\vartheta$  — время инерции, сек.;  $p_1$  — максимальное по спектру значение коэффициента поглощения света молекулами светочувствительного вещества;  $B$  — яркость фона, нт;  $n_0$  — число квантов, которые нужно собрать и использовать за время  $\vartheta$  с площади фона, равной площади объекта, для того чтобы этот объект разрешался при  $k=1$ . По нашим данным,  $n_0=5$ .

Коэффициент  $a$  различен для колбочек и для палочек.

Для дневного зрения  $a=2.44 \cdot 10^{-6}$  см · сек.<sup>1/2</sup> · нт.<sup>1/2</sup>. Для сумеречного зрения, если спектральный состав света соответствует источнику А,  $a=3.77 \cdot 10^{-6}$  см · сек.<sup>1/2</sup> · нт.<sup>1/2</sup>.

Пользуюсь случаем разъяснить некоторое недоразумение. Е. С. Ратнер [9] в очень интересной статье, в которой он уточняет флуктуационную формулу для остроты зрения, приводит выражение

$$k^2 \vartheta^2 B = \text{const},$$

называя его формулой Роза—Луизова. Но Роз [10] вывел такую формулу не для глаза, а для идеального преобразователя, параметры которого не меняются с изменением яркости, из моей же формулы следует, что

$$k^2 \vartheta^2 B = a \sqrt{n_0} \vartheta p_1 D^2.$$

Здесь только первые два множителя  $a \sqrt{n_0}$  можно считать величиной постоянной (да и то это не совсем верно для  $a$ ), что же касается  $\vartheta$ ,  $p_1$  и  $D$ , то все они — функции яркости и притом все убывают с возрастанием яркости так, что компенсировать друг друга не могут.

Увеличение площади суммирования зрительных раздражений с понижением яркости происходит сравнительно медленно в течение процесса темновой адаптации. Но совершенно изумительна способность зрения пере-

страиваться при неизменной яркости в зависимости от контраста и величины подлежащего рассмотрению объекта. Именно здесь проявляется поистине чудесная гибкость механизма зрительных восприятий.

Инженеры и конструкторы, занятые разработкой зрительных устройств (телескопы, микроскопы, телевизоры и т. д.), издавна интересуются работой глаза. Но долгое время они интересовались глазом только для того, чтобы лучше приспособить свои приборы к свойствам глаза. Сейчас все чаще конструкторы стараются разгадать механизм работы глаза для того, чтобы в той или иной мере скопировать его в разрабатываемых зрительных приборах. И во многих отношениях глаз остается еще недостижимым для современной техники образцом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Кравков. Глаз и его работа. Изд. АН СССР, М.—Л., 1950.
2. Н. А. Валуc. Как видит глаз. Гостехиздат, М., 1948.
3. I. Le Grand. Optique physiologique. Paris, 1952.
4. H. Schöber. Das Sehen. Leipzig, 1957.
5. Г. Хартридж. Современные успехи физиологии зрения. ИЛ, М., 1952.
6. A. Ivanoff. Les aberrations de l'oeil. Paris, 1953.
7. Леонардо да Винчи. Избранные естественно-научные произведения. Изд. АН СССР, М.—Л., 1955.
8. В. Д. Глезер, И. И. Цуккерман. Информация и зрение. Изд. АН СССР, М.—Л., 1961.
9. Е. С. Ратнер. Докл. АН СССР, 105, 90, 1955.
10. A. Rose, J. Opt. Soc. Amer., 38, 196, 1948.
11. А. В. Луизов. Инерция зрения. Оборонгиз, М., 1961.

В. Р. МУРАТОВ, Е. В. НИЛОВ

### КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, НАБЛЮДАЕМОГО НА ЭКРАНЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Применение электронно-оптических преобразователей для визуального наблюдения или фотографической регистрации изображения, образованного оптическим прибором, позволяет расширить область спектральной чувствительности используемых приемников излучения — глаза или фотографического материала. С помощью преобразователей удастся также получить существенный выигрыш по чувствительности в случае регистрации слабых световых потоков [1]. В связи с этим при конструировании оптических приборов, снабженных электронно-оптическими преобразователями, важно правильно решить вопрос о выборе оптимальных характеристик отдельных элементов таких приборов в целях наиболее эффективного использования свойств преобразователя. Такой вопрос можно успешно решить лишь в том случае, если известны все характеристики, достаточно полно описывающие свойства преобразователя.

В настоящей работе рассматривается вопрос об оценке одной из таких характеристик электронно-оптического преобразователя — разрешающей способности.

Существующий в настоящее время способ оценки разрешающей способности преобразователя основан на измерении числа штрихов в изображении стандартной фотографической миры стопроцентного контраста, приходящихся на один миллиметр фотокатода, которое может быть визуально разрешено при оптимальных значениях яркости экрана и масштаба увеличения наблюдательного микроскопа. Подобный метод оценки качества изображения не дает возможности правильно судить о разрешающей способности преобразователя при наблюдении объектов с контрастом, отличным от 100%, а также не позволяет установить связь между контрастом предмета и контрастом его изображения на экране электронно-оптического преобразователя.

Очевидно, что для оценки способности преобразователя к правильной передаче мелких деталей изображения необходимо ввести более полную характеристику, включающую приведенное выше определение разрешающей способности в качестве предельного случая.

Известно, что при проецировании на фотокатод преобразователя изображения, имеющего достаточно большие размеры, яркость его экрана может с удовлетворительной для практики степенью точности считаться прямо пропорциональной освещенности на фотокатоде.

Однако при передаче мелких деталей изображения эта пропорциональность нарушается, что влечет за собой нарушение подобия между изображением, наблюдаемым на экране, и изображением на фотокатоде. Причинами этого являются рассеяние внутри колбы преобразователя света,

частично прошедшего через полупрозрачный фотокатод, aberrации электронной оптики, рассеяние света в слое люминофора экрана, а также многократные отражения в толще стекла экрана и фотокатода. В результате совместного действия всех этих факторов светящаяся точка, спроецированная на фотокатод, будет изображаться на экране в виде светового пятна конечного размера.

Представляется целесообразным использовать для оценки качества изображения, создаваемого на экране преобразователя, распределение яркости в изображении светящейся точки, как это имеет место в оптике [2].

Наблюдаемое в ряде случаев несимметричное распределение яркости в изображении точечного объекта на экране может быть объяснено aberrациями электронной оптики, величина которых для аксиально-симметричной оптической системы зависит от расстояния до оси.

Экспериментальное нахождение функций распределения яркости в изображении точки может быть осуществлено путем исследования распределения яркости в изображении на экране преобразователя бесконечно узкой линии, спроецированной на фотокатод.

Пусть яркость в изображении некоторого объекта в плоскости фотокатода является функцией только одной координаты ( $x$ ) и обозначается  $f(x)$ , а  $\varphi(x)$  есть распределение яркости в изображении на экране преобразователя проецированной на фотокатод бесконечно узкой линии, ориентированной перпендикулярно оси  $x$ . В этом случае распределение яркости  $F(x')$  в изображении исследуемого объекта на экране преобразователя будет определяться сверткой этих функций

$$F(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) f(x' - x) dx. \quad (1)$$

Интегрирование в этой формуле должно производиться по тому интервалу значений  $x$ , в котором  $\varphi(x) \neq 0$ . При записи формулы (1) предполагалось, что электронно-оптическое увеличение преобразователя равно единице. В случае иных значений увеличения зависимости вида  $\varphi(x)$  и  $F(x')$  будут представлять собой функции распределения яркости на экране, пересчитанные по масштабу изображения на входном фотокатоде. Необходимо отметить, что формула (1) правильно описывает распределение яркости в изображении при отсутствии шумов преобразователя, которые в процессе измерений яркости приводят к появлению случайных ошибок.

Причиной появления этих шумов являются флуктуации яркости изображения, возникающие вследствие зернистости экрана, термотока с фотокатода, а также вследствие флуктуаций интенсивности светового потока при низких уровнях освещенности на фотокатоде.

На основании общих положений теории спектров [3] функция  $F(x')$  может быть представлена в виде суммы бесконечно большого числа синусоидальных составляющих с различными периодами

$$F(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_F(\omega) e^{j\omega x'} d\omega, \quad (2)$$

где  $S_F(\omega)$  — комплексный спектр функции  $F(x')$ , определяемой как

$$S_F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x') e^{-j\omega x'} dx'. \quad (3)$$

В этих формулах  $\omega$  — пространственная частота, определяемая как

$$\omega = 2\pi N x', \quad (4)$$

где  $N$  — период, измеряемый, например, в обратных миллиметрах.

Спектр результирующей функции  $S_F(\omega)$  будет представлять собой произведение спектров подвергающихся свертке функций

$$S_F(\omega) = S_f(\omega) S_\varphi(\omega). \quad (5)$$

Таким образом, знание спектров функций  $f(x)$  и  $\varphi(x)$  позволяет по формуле (5) найти спектр функции  $F(x')$ , а затем по формуле (2) и саму функцию  $F(x')$ .

Пусть яркость в изображении на поверхности фотокатода изменяется по синусоидальному закону

$$f(x) = I_1(\omega) + \Delta I_1(\omega) e^{j\omega x}. \quad (6)$$

Поскольку электронно-оптический преобразователь может в определенных пределах считаться линейной системой, распределение яркости в изображении на экране будет также синусоидальным

$$F(x) = I_2(\omega) + \Delta I_2(\omega) e^{j[\omega x + \varphi(\omega)]}. \quad (7)$$

Здесь

$$I_2 = \eta I_1, \text{ а } \Delta I_2 = \eta R(\omega) \Delta I_1,$$

где  $\eta$  — коэффициент преобразования электронно-оптического преобразователя;  $R(\omega)$  — некоторая функция пространственной частоты, описывающая искажения, вносимые преобразователем в изображение периодической структуры наблюдаемого объекта.

Применяя к формулам (6) и (7) преобразование Фурье [3], получаем на основании формулы (5) следующее выражение:

$$S_\varphi(\omega) = \frac{S_F(\omega)}{S_f(\omega)} = R(\omega) \eta e^{j\varphi(\omega)}, \quad (8)$$

где

$$R(\omega) \eta = |S_\varphi(\omega)|. \quad (9)$$

Сомножитель  $e^{j\varphi(\omega)}$  в формуле (8) появляется в том случае, когда функция  $\varphi(x)$  несимметрична относительно своего максимума. Это имеет место на краю экрана, где электронно-оптические aberrации имеют значительную величину. Для области вблизи центра экрана функцию  $S_\varphi(\omega)$  можно считать чисто вещественной.

Следует отметить, что на основании изложенного выше функция  $R(\omega)$  может быть представлена как отношение величины относительной амплитуды в изображении синусоидальной миры на экране к величине относительной амплитуды в изображении этой же миры на фотокатоде преобразователя

$$R(\omega) = \frac{\frac{\Delta I_2}{I_2}}{\frac{\Delta I_1}{I_1}}. \quad (10)$$

Введя обозначения  $I_{\max} = I + \Delta I$  и  $I_{\min} = I - \Delta I$ , перепишем формулу (10) в следующем виде:

$$R(\omega) = \frac{\frac{I_{2 \max} - I_{2 \min}}{I_{2 \max} + I_{2 \min}}}{\frac{I_{1 \max} - I_{1 \min}}{I_{1 \max} + I_{1 \min}}}. \quad (11)$$

Выражения в числителе и знаменателе формулы (11) представляют собой контрасты изображения соответственно на экране и фотокатоде. Таким образом, функция  $R(\omega)$  представляет собой коэффициент передачи контраста синусоидальной миры с пространственной частотой  $\omega$ .

Совокупность значений коэффициентов передачи контраста, относящихся к различным значениям пространственной частоты, носит название частотно-контрастной характеристики [4]. Формула (11) позволяет экспериментально оценить величину  $R(\omega)$  путем сравнения контраста в изображении синусоидальной миры на экране преобразователя с контрастом изображения этой же миры на фотокатоде.

Следует отметить, что экспериментальное осуществление синусоидального распределения яркости встречает значительные трудности. Значительно проще изготовить миру со ступенчатым распределением яркости, состоящую из чередующихся прозрачных и непрозрачных полос. Между значениями  $R(\omega)$  и  $k(\omega)$ , представляющими собой коэффициенты передачи контраста для синусоидальной и ступенчатой мир, существует зависимость следующего вида [5]:

$$R(\omega) = \frac{\pi}{4} \left[ k(\omega) + \frac{k(3\omega)}{3} - \frac{k(5\omega)}{5} + \frac{k(7\omega)}{7} - \dots \right]. \quad (12)$$

Эта формула позволяет по полученной экспериментальным путем зависимости  $k(\omega)$  найти требуемую зависимость  $R(\omega)$ .

Вопрос о возможности применения частотно-контрастной характеристики для описания качества изображения, даваемого электронно-оптическим преобразователем, и оценки его разрешающей способности рассматривался в нашей работе [6].

Для определения коэффициентов передачи контраста преобразователя была собрана установка, позволяющая проецировать на фотокатод различные элементы стандартной штриховой фотографической миры, обычно используемой для измерения разрешающей способности оптических систем. Частотно-контрастная характеристика снималась лишь для центральной части фотокатода. Уменьшение контраста изображения вследствие темнового фона, обусловленного термоэмиссией с фотокатода, учитывалось путем применения методики, обычно используемой при фотографических спектральных работах [7]. Уровень освещенности фотокатода выбирался таким, чтобы относительное значение флуктуации числа фотоэлектронов было достаточно малым и не влияло на точность определения контраста изображения на экране преобразователя.

Необходимо указать, что частотно-контрастная характеристика является функцией, объективно характеризующей качество работы преобразователя и позволяющей по распределению яркости в изображении на экране электронно-оптического преобразователя восстановить истинное распределение яркости по поверхности наблюдаемого объекта только в том случае, если преобразователь является линейной системой. Однако хорошо известно, что при достаточно высоких значениях яркости экрана возникают ореолы, окружающие яркие детали изображения, т. е. экран преобразователя ведет себя как нелинейный элемент системы.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что уменьшение яркости экрана преобразователя от максимального значения, при котором становится заметен ореол, приводит к незначительному росту контраста изображения. Так, для одного из обследованных преобразователей типа ПИМ-3 уменьшение яркости на три порядка от значения, равного 3000 нт, привело к увеличению контраста на 10%. Есть все основания считать, что преобразователь является линейной системой и при значительно более низких уровнях яркости экрана в том случае, если приняты эффективные меры для устранения темнового фона [8].

Для окончательного суждения о линейности преобразователя необходимо было показать, что коэффициент передачи контраста не зависит

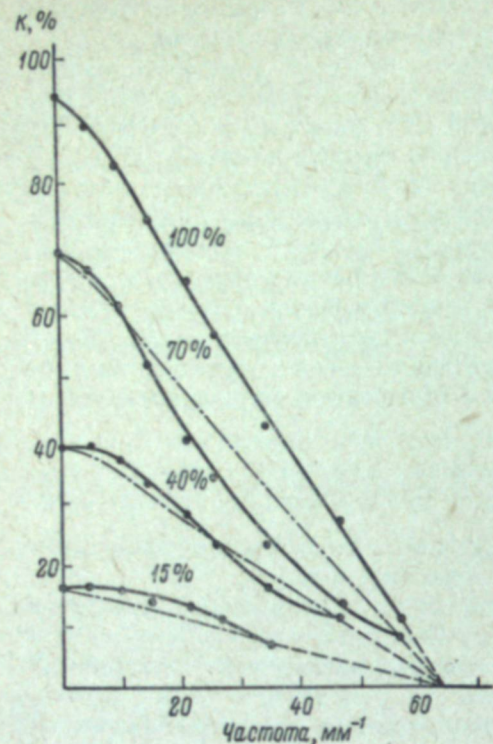


Рис. 1.

от величины контраста передаваемого объекта, которым может быть, в частности, мира.

На рис. 1 сплошными линиями представлены экспериментальные кривые, иллюстрирующие зависимость величины контраста изображения на экране преобразователя типа ПИМ-3 от частоты штрихов мира с первоначальным контрастом в 100, 75, 40 и 15%. Кривая, относящаяся к сто процентному контрасту мира, является по определению частотно-контрастной характеристикой преобразователя. На том же рисунке штрихпунктирными линиями изображены зависимости величины контраста изображения от частоты штрихов мира, построенные по частотно-контрастной характеристике в предположении, что коэффициенты передачи контраста преобразователя не зависят от величины контраста мира. Принимая во внимание ограниченную точность используемой фотографической методики [6],

можно считать совпадение экспериментальных и расчетных кривых удовлетворительным. Это позволяет сделать вывод, что значения коэффициентов передачи контраста преобразователя действительно не зависят от контраста мира.

Таким образом, можно считать установленным, что в определенном интервале изменения яркостей наблюдаемого объекта частотно-контрастная характеристика преобразователя является функцией, объективно характеризующей способность преобразователя к передаче мелких деталей изображения.

На рис. 2 приведены частотно-контрастные характеристики трех различных типов электронно-оптических преобразователей, обладающих разной разрешающей способностью. На рис. 3 приведены экспериментальные точки, по которым могут быть построены частотно-контрастные характеристики преобразователей 1 и 2 (рис. 2), пересчитанные в масштабе, соответствующем разрешающей способности наилучшего преобразователя (3); сплошной линией проведена частотно-контрастная характеристика преобразователя 3 (рис. 2). Из рис. 3 видно, что общий ход приведенных частотно-контрастных характеристик для всех трех типов преобразователей в основном одинаков.

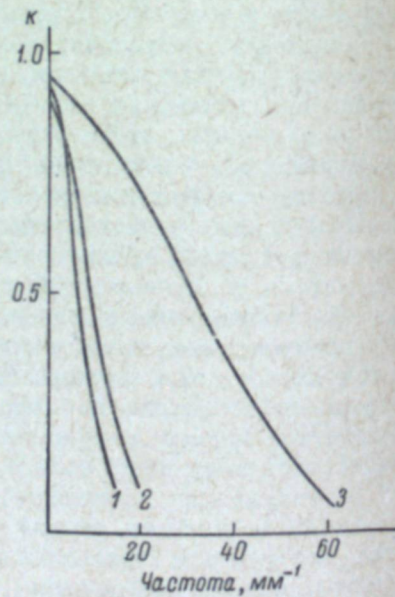


Рис. 2.

Было также установлено, что как в случае визуального наблюдения, так и при фотографической регистрации изображения, образованного на экране преобразователя, предел разрешения мира наступает в том случае, когда контраст изображения достигает своего предельного значения, близкого к 10% (см. рис. 1).

Существование отличного от нуля предельного контраста приводит к тому, что разрешающая способность преобразователя оказывается зависящей от контраста мира. На рис. 4 приведена кривая, построенная по полученным в результате эксперимента точкам и иллюстрирующая зависимость минимального контраста мира, при котором ее штрихи перестают разрешаться, от частоты этих штрихов. Обращает на себя внимание

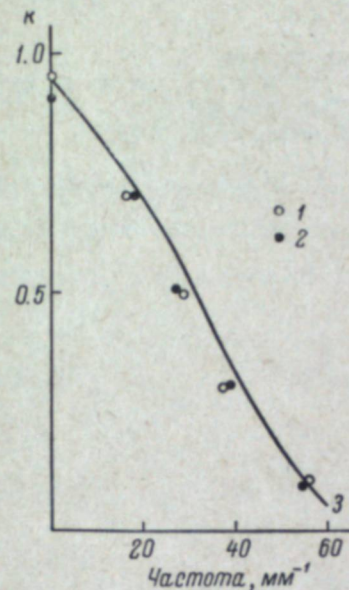


Рис. 3.

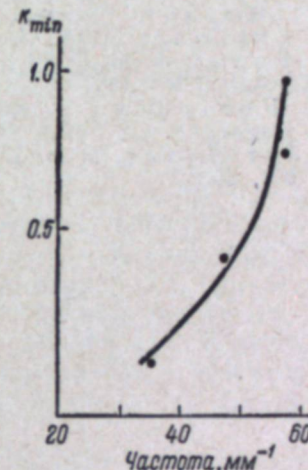


Рис. 4.

сильное уменьшение разрешающей способности преобразователя по мере уменьшения контраста мира.

Как видно из рис. 1, преобразователь не передает пространственных частот в изображении объекта, превышающих  $60 \text{ мм}^{-1}$ . Таким образом, отличие частотно-контрастной характеристики, определенной по штриховой мире, от той же характеристики, найденной по синусоидальной мире на основании формулы (12), сказывается лишь при малых частотах (менее  $20 \text{ мм}^{-1}$ ).

Поскольку нас интересовала в основном способность преобразователя к передаче мелких деталей изображения, это отличие можно в расчет не принимать.

## Выводы

Для полной характеристики способности электронно-оптического преобразователя к передаче мелких деталей изображения необходимо знать следующие величины: визуальную разрешающую способность для различных расстояний от центра фотокатода, частотно-контрастную характеристику преобразователя и ее изменение с увеличением расстояния от центра фотокатода, зависимость  $\delta(\omega)$  от этого расстояния и зависимость между значениями предельного контраста и частотой штрихов мира, применяемой для оценки качества преобразователя.

Большое количество параметров, описывающих способность преобразователя к правильной передаче мелких деталей изображения, представляет, естественно, большое неудобство в практической работе по паспор-

тизации преобразователей. Следует, однако, учесть, что большое количество перечисленных параметров может быть существенно сокращено в том случае, если некоторые из них являются типичными для определенного вида преобразователей. Например, такой параметр, как частотно-контрастная характеристика, может быть заменен параметром разрешающая способность, если ход частотно-контрастной характеристики известен и сохраняется для всех преобразователей данного вида.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Бутслов, Усп. научн. fotogr., VI, 76, 1959.
2. R. L. Lamberts, G. C. Higgins, R. N. Wolfe, JOSA, 48, 487, 1958.
3. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. ГТТИ, М., 1957.
4. А. Т. Ащеулов, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 7, 10, 1960.
5. J. H. Coltman, JOSA, 44, 468, 1954.
6. В. Д. Волосов, В. Р. Муратов, Е. В. Нилов, Приборы и техника эксперимента, № 1, 113, 1963.
7. В. К. Прокофьев. Фотографические методы количественного спектрального анализа, ч. II. ГТТИ, М.—Л., 1951.
8. Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, Т. Е. Смолкин, Докл. АН СССР, 111, 996, 1956.

## V. ЗЕРНИСТАЯ СТРУКТУРА ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. В. ГУРЕВИЧ, И. И. БРЕЙДО, Г. А. ГАВРИЛОВ

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В ФОТОГРАФИИ

В литературе уделяется большое внимание вопросам, связанным с неоднородностью структуры проявленного фотографического слоя. Результаты подобных исследований важны для художественной фотографии, кинематографии и в особенности для научной и прикладной фотографии. Количественная оценка неоднородности почернения проявленных слоев играет важнейшую роль при определении предельного количества различных градаций яркости, предельной точности фотографической фотометрии и действительной чувствительности фотографических материалов.

Все известные методы оценки неоднородности почернения могут быть разбиты на три группы: методы определения зернистости по визуальной оценке неоднородности почернения увеличенного фотографического изображения [1—3], инструментальные методы измерения флуктуаций почернения с помощью приборов, учитывающих характеристики глаза [4], и чисто объективные расчетные и инструментальные методы оценки и измерения флуктуаций [5—7].

Для научной и прикладной фотографии наибольшее значение имеет последняя группа измерений.

В последнее время установлена аналогия между зернистостью фотографических материалов и шумами в электрических цепях [8]. Подход к неоднородности почернения, как к шумам фотографического материала, позволил получить результаты, важные как для дальнейшего исследования вопроса зернистости, так и для решения указанных выше задач.

Подобный подход к оценке флуктуаций почернения требует проведения экспериментов с различными фотографическими материалами. Величины, характеризующие фотографические шумы, могут быть определены либо в результате расчетов по данным микрофотометрирования, либо в результате непосредственных измерений по показаниям приборов в сконструированной для этой цели установке. Существенными преимуществами второго метода являются большая его точность и значительно меньшая трудоемкость.

Отсутствие инструментальных методов измерения флуктуаций почернения фотографических материалов и трудоемкость расчетных методов явились причиной того, что в отечественной литературе практически отсутствуют данные об отношении сигнал/шум для различных фотографических материалов.



Роль, аналогичную флуктуациям числа электронов, вылетающих с фотокатода под действием одного и того же числа квантов света, в фотографии играют флуктуации числа проявленных зерен. При рассмотрении этих флуктуаций будем считать справедливыми следующие положения: а) проявленные зерна можно считать абсолютно непрозрачными [9]; б) с достаточным приближением можно пренебречь различием в размерах зерен [9]; в) зерна многоярусного фотографического слоя, перекрытые другими зернами, не регистрируются и соответственно не оказывают влияния на флуктуации числа обнаруживаемых проявленных зерен.

При этих предположениях фотографический шум выразится средним квадратичным отклонением от среднего числа неперекрываемых проявленных зерен, а сигнал — средним числом этих зерен за вычетом зерен вуали.

Следовательно, величина отношения сигнал/шум, измеренная для данной фотографической эмульсии при некотором заданном размере элемента и заданных экспозиции и условиях проявления, выражается соотношением  $\psi_m = \frac{\bar{m} - \bar{m}_v}{\sqrt{(m - \bar{m})^2}}$ , где  $\bar{m}$  — среднее число неперекрываемых проявленных зерен со средней эффективной площадью сечения  $s$ ;  $\bar{m}_v$  — среднее число неперекрываемых зерен вуали;  $m$  — число неперекрываемых проявленных зерен в каждом отдельно оцениваемом элементе;  $\sigma_m = \sqrt{(m - \bar{m})^2}$  — средняя квадратичная флуктуация числа зерен (фотографические шумы).

Очевидно, что в элементе площадью  $S_a$  может уместиться всего  $M = \frac{S_a}{s}$  сечений неперекрываемых проявленных и непроявленных зерен. В то же время площадь, занятая проявленными зернами, окажется равной  $S_n = ms$ . Следовательно,  $m = M \frac{S_n}{S_a}$ . Далее нетрудно заметить, что если на поверхность фотометрируемого элемента падает световой поток  $F_0$ , а проходит поток  $F$  и каждый из них, упав на фотокатод фотоэлемента или фотоумножителя, превращается в фототоки  $i_0 = \varepsilon F_0$  и  $i = \varepsilon F$  (где  $\varepsilon$  — чувствительность прибора, в мка/лм), то при сделанных выше предположениях  $S_n = k(F_0 - F) = k\varepsilon(i_0 - i)$  и  $S_a = kF_0 = k\varepsilon i_0$ . Таким образом,  $m = M \frac{S_n}{S_a} = \frac{M}{i_0}(i_0 - i)$ ,  $\bar{m} = \frac{M}{i_0}(i_0 - \bar{i})$  и  $m_v = \frac{M}{i_0} \times (i_0 - \bar{i}_v)$ , где  $\bar{i}$  — среднее значение силы тока  $i$ , а  $\bar{i}_v$  — среднее значение силы тока при фотометрировании вуали.

Нетрудно видеть, что  $(m - \bar{m})^2 = \frac{M^2}{i_0^2}(i - \bar{i})^2$  и, следовательно,  $\sigma_m = \frac{M}{i_0} \sqrt{(i - \bar{i})^2}$ . Для окончательного выражения имеем:

$$\psi_m = \frac{\bar{m} - \bar{m}_v}{\sqrt{(m - \bar{m})^2}} = \frac{\frac{M}{i_0}(i_v - \bar{i})}{\frac{M}{i_0} \sqrt{(i - \bar{i})^2}} = \frac{i_v - \bar{i}}{\sqrt{(i - \bar{i})^2}}$$

Необходимо отметить, что многие авторы [6, 7, 9] под сигналом понимают не среднее число неперекрываемых проявленных зерен  $\bar{m}$ , а среднее значение оптической плотности  $\bar{D}$ . Соответственно под шумами эти авторы понимают среднее квадратичное отклонение от средней плотности  $\bar{D}$

$$\sigma_D = \sqrt{(D - \bar{D})^2}$$

Для проявленного слоя, в котором зерна расположены в несколько рядов, можно, при сделанных выше предположениях, считать, что  $D = \lg \frac{M}{M - m}$ . Это выражение не учитывает рассеяния света зернами. В действительности проявленные зерна рассеивают свет, причем тем сильнее, чем их больше. Вследствие этого при  $m \rightarrow M$  плотность реального слоя стремится не к бесконечности, как это следует из приведенной формулы, а к  $D_{\max}$ , различному для разных слоев. Однако для не слишком больших плотностей указанной формулой можно пользоваться с достаточно хорошим приближением.

Нетрудно видеть, что отношение сигнал/шум  $\psi_m = \frac{\bar{m} - \bar{m}_v}{\sqrt{(m - \bar{m})^2}}$  не равно отношению сигнал/шум  $\psi_D = \frac{\bar{D} - \bar{D}_v}{\sqrt{(D - \bar{D})^2}}$  даже в том случае,

если они получены для одних и тех же материалов и при одних и тех же условиях. Непосредственно измеряемыми, прямо пропорциональными световому потоку, проходящему через сканируемый элемент, являются величины  $i$  и  $\sqrt{(i - \bar{i})^2}$ , пропорциональные  $M - \bar{m}$  и  $\sqrt{(m - \bar{m})^2}$ , а не  $\bar{D}$  и не  $\sqrt{(D - \bar{D})^2}$ . Преобразование величины, пропорциональной  $M - \bar{m}$ , в  $\bar{D}$ , осуществляемое в денситометре, и оценка флуктуаций на выходе денситометра фактически представляют собой измерения флуктуаций почернения фотографического материала нелинейным (в данном случае логарифмическим) прибором, изменяющим характер распределения первоначальной величины. В результате такого изменения среднее квадратичное отклонение на выходе нелинейного прибора не будет прямо пропорционально входному среднее квадратичному отклонению непосредственно измеряемой величины. Из сказанного следует, что измеренная величина  $\psi_D$  не может быть принята за основу при оценке числа объективно различных градаций яркости, точности микрофотометрических измерений и при оценке информационной чувствительности фотографических материалов.

Указанные выше соображения явились основанием для отказа от непосредственного измерения  $\psi_D$  в пользу непосредственного измерения  $\psi_m$ .

Необходимо отметить, что по данным измерения  $\psi_m$  можно получить расчетное значение  $\psi_D$ . Эта величина будет отличаться от измеренной величины  $\psi_D$  тем, что основывается на измеренных флуктуациях непосредственно оцениваемой величины  $\sigma_m$ . Расчетное  $\psi_D$  может быть получено из данных измерения  $\bar{i} = k(M - \bar{m})$  и  $\sigma_i = \sqrt{(i - \bar{i})^2} = k\sigma_m = k \times \sqrt{(m - \bar{m})^2}$  следующим образом. Введем величины  $D_+ = \lg \frac{M}{M - \bar{m} - \sigma_m} = \lg \frac{i_0}{i - \sigma_i}$ ,  $D_- = \lg \frac{i_0}{i + \sigma_i}$ . Тогда  $\bar{D} = \frac{D_+ + D_-}{2}$  и  $\sigma_D = \frac{D_+ - D_-}{2}$ . Для величины отношения сигнал/шум  $\psi_D$  имеем:

$$\psi_D = \frac{\bar{D}}{\sigma_D} = \frac{D_+ + D_-}{D_+ - D_-} = \frac{\lg \frac{i_0}{i^2 - \sigma_i^2}}{\lg \frac{1 + \frac{\sigma_i}{i}}{1 - \frac{\sigma_i}{i}}}$$

При  $\sigma_i < i$

$$\lg \frac{i_0^2}{i^2 - \sigma_i^2} \cong \lg \frac{i_0^2}{i^2} = 2D, \text{ а } \lg \frac{1 + \frac{\sigma_i}{i}}{1 - \frac{\sigma_i}{i}} \cong 0.434 \cdot 2 \frac{\sigma_i}{i}.$$

В таком случае  $\psi_D = 2.3 \frac{D\tau}{\sigma_i}$ , а  $\sigma_D = 0.434 \frac{\sigma_i}{i}$ . Эти выражения выполняются с хорошей точностью уже при  $\psi_i = 2 \div 3$ .

#### Описание измерительной установки

В данной работе для измерения отношения сигнал/шум использовался модернизированный микрофотометр МФ-4, оптическая схема которого приведена на рис. 1.

Свет от кинопроекторной лампы 1 проходит конденсор 2, осветительную щель 3, призму 4 и осветительный объектив 5, который проецирует

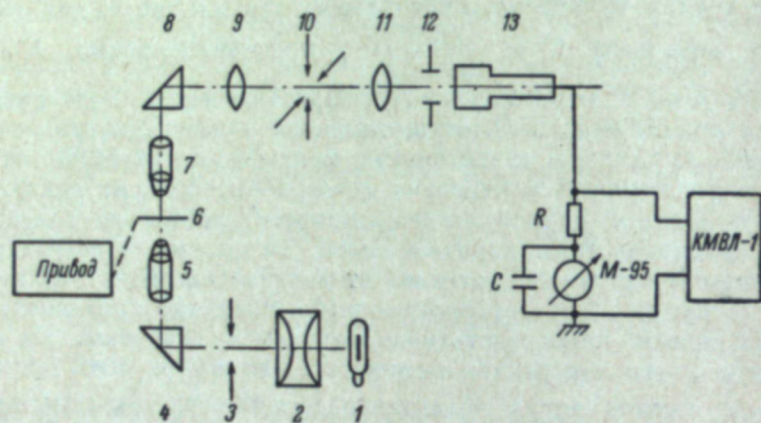


Рис. 1. Схема измерительной установки.

рует указанную щель на образец 6. Этот последний с изображением осветительной щели проецируется объективом 7, призмой 8 и смежными линзами 9 на измерительную щель 10, регулируемую по ширине и высоте. Затем свет через линзу 11 и диафрагму 12 попадает на фотоэлектронный умножитель 13. Наибольшее увеличение, даваемое микрофотометром, составляет  $30\times$ .

Равномерно экспонированный и проявленный фотографический образец помещается на предметный стол, и осуществляется очень тщательная фокусировка изображения на наблюдательном экране в плоскости измерительной щели. Сканирование производится поступательным перемещением стола вместе с образцом относительно неподвижного светового луча. При этом переменная составляющая сигнала с нагрузки ФЭУ подается на вольтметр эффективных значений КМВЛ-1, показания которого оказываются пропорциональными величине шумов фотографического материала. Постоянная составляющая тока измеряется с помощью микроамперметра М-95.

Практически формула для вычисления отношения сигнал/шум выглядит следующим образом:

$$\psi = \frac{(r_{в.} - r) R_{н.}}{u_{ш.}}$$

где  $R_{н.}$  — нагрузка ФЭУ, а  $u_{ш.} = \sqrt{(u - a)^2}$  — напряжение шумов фотографического материала.

Измерения производятся в следующем порядке: сперва измеряется величина  $i_0$ , пропорциональная световому потоку  $F_0$ , проходящему через подложку без почернения. Затем осуществляется перемещение фотографического материала и измеряются величины  $i$  и  $u_{ш.}$

Для нормальной работы установки желательно, чтобы шумы, измеряемые с помощью КМВЛ-1, были предварительно усилены, так как в этом случае можно пренебречь различными паразитными наводками. Желательно также, чтобы собственные шумы фотоэлектрического преобразователя были относительно малы.

Повышение чувствительности установки было осуществлено в результате замены фотоэлемента в микрофотометре МФ-4 фотоэлектронным умножителем ФЭУ-19М. Величина нагрузки ФЭУ была выбрана 1.0 Мом. Для уменьшения паразитных наводок все соединения выполнены экранированными проводами. Устранение паразитной составляющей двойной частоты сети на выходе ФЭУ достигнуто за счет питания осветительной лампочки микрофотометра постоянным напряжением. Низкий уровень собственных шумов ФЭУ достигнут в результате применения напряжения питания ФЭУ 800 в, тщательной фильтрации его и рационального сокращения полосы частот. В тех же случаях, когда переменная составляющая сигнала на выходе ФЭУ все же мала (что имеет место при измерении шумов мелкозернистых почернений малой плотности), отклонение стрелки прибора сравнимо с отклонениями, вызванными шумом ФЭУ. В этом случае шумы материала вычисляются по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{пр.}^2 - \sigma_{ФЭУ.}^2},$$

где  $\sigma_{пр.}$  — показания прибора;  $\sigma_{ФЭУ.}$  — показания прибора, вызванные собственными шумами ФЭУ.

Отклонения стрелочного прибора становятся малыми также при использовании сканирующего пятна большого размера, так как тогда фотографические шумы соответствующим образом уменьшаются. В этом случае также следует пользоваться приведенной выше формулой.

#### Исследование метода

Необходимая скорость перемещения исследуемого фотоматериала относительно измерительной щели определяется полосой частот вольтметра КМВЛ-1.

Нижняя граница полосы пропускания КМВЛ-1 определяет минимальную скорость сканирования образца. На рис. 2 показан график зависимости показаний прибора от скорости сканирования  $v$  при максимальной площади сечения сканирующего пучка  $500 \text{ мк}^2$  и отношении продольного размера к поперечному 5:1. Из рисунка видно, что при такой большой щели и неблагоприятном соотношении ее линейных размеров наблюдается уменьшение показаний прибора при скоростях сканирования,

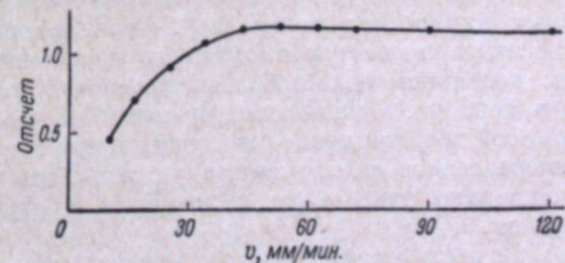


Рис. 2. Зависимость показаний вольтметра КМВЛ-1 от скорости сканирования.

меньших 45 мм/мин. При уменьшении площади сканирующего пятна и уменьшении его размеров в направлении перемещения изменение показаний вольтметра КМВЛ-1 происходит при меньших скоростях.

Экспериментально было установлено, что увеличение скорости сканирования приводит к более устойчивому положению стрелки вольтметра, поскольку спектр шумов смещается в область более высоких частот и меньше сказывается на неравномерности перемещения образца.

Исходя из приведенных соображений скорость сканирования была выбрана 120 мм/мин.

Максимальная частота шумов фотографического материала лежит значительно ниже верхнего значения частотного предела вольтметра, поэтому для уменьшения влияния шумов ФЭУ, лежащих в широкой полосе, желательно сократить полосу прибора. Максимальная частота сигнала может быть вычислена по формуле

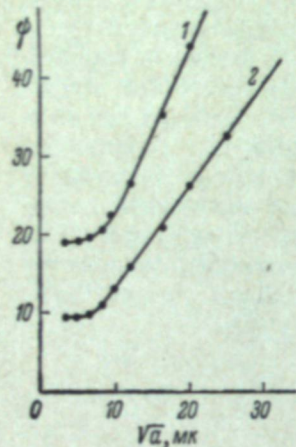


Рис. 3. Зависимость  $\phi$  от площади сечения сканирующего пучка.

1 — диапозитивные пластинки;  
2 — пластинки Астро, Агфа.

Основная трудность измерения отношения сигнал/шум фотографических материалов заключается в сложности изготовления чистых образцов, в особенности на мелкозернистых высококонтрастных материалах. Кроме необходимости обеспечения точной равномерности экспонирования, важно, чтобы образцы не имели царапин и загрязнений. Наличие этих дефектов приводит к получению преуменьшенного значения сигнал/шум. Кроме того, усложняется сама процедура проведения измерений, поскольку имеющиеся дефекты фотографического слоя приводят к неустойчивым показаниям вольтметра. Стрелка прибора совершает колебания относительно некоторого среднего положения. Для получения устойчивых показаний целесообразно увеличить постоянную времени стрелочного прибора. Однако следует помнить, что чрезмерное увеличение постоянной времени приводит к увеличению времени измерения (увеличению протяженности сканируемого участка), что в свою очередь предъявляет повышенные требования к размерам и равномерности экспонирования образца.

При исследовании данного метода была снята зависимость величины отношения сигнал/шум от корня квадратного площади сечения сканирующего пучка  $a$ . С учетом биномиального распределения отклонений случайной величины (как и в случае распределения Гаусса и Пуассона) подобная зависимость должна выражаться прямой линией. Экспериментальные кривые для двух различных фотографических материалов приведены на рис. 3, из которого видно, что линейная зависимость хорошо выпол-

$$f_{\max} = \frac{v}{2d_{\min}},$$

где  $v$  — скорость перемещения материала;  $d_{\min}$  — минимальный размер щели в направлении движения.

В качестве простейшего фильтра нижних частот может быть использована цепочка RC. Коэффициент частотных искажений такой цепочки на граничной частоте

$$y = \frac{k}{k_0} = \sqrt{\frac{1}{1 + \Omega_{\max}^2}},$$

где  $\Omega_{\max} = 2\pi f_{\max} RC$ .

Из этой формулы может быть найдена необходимая величина емкости, шунтирующей нагрузку ФЭУ.

Из этой формулы может быть найдена необходимая величина емкости, шунтирующей нагрузку ФЭУ.

няется при  $\sqrt{a} > 8$  мк. Отклонение от прямой линии при малых размерах сканирующей щели может быть, вероятно, объяснено рядом причин, и в том числе возможной расфокусировкой щели по толщине эмульсионного слоя. Подобные отклонения были обнаружены в ряде других работ, например при исследовании гранулярности по Селвину [6].

Определенный интерес представляет расчет величины  $\psi$  по данным, полученным при различной форме сканирующей щели, но при неизменной площади. Было установлено, что форма щели не влияет на величину шумов, а следовательно, и на величину отношения сигнал/шум. На рис. 4 показаны различные формы щели, с которыми производился эксперимент. Из приводимых ниже данных видно, что результаты измерений во всех случаях примерно одинаковы в пределах точности метода:

$a \times b^*$	46.7 × 10.7	23.3 × 21.4	15.5 × 32.1	11.7 × 42.8
$\psi$	25.8	25.0	26.4	26.1

Точность измерения отношения сигнал/шум данным методом не является постоянной величиной и зависит от величины шумов исследуемого материала и оптической плотности образца.

Ниже представлены результаты оценки точности ( $\delta, \%$ ) метода для двух существенно различных по шумам материалов: для пластинок диапозитивных (мелкозернистых) и Астро (средней зернистости) фирмы Агфа:

Материалы	$D$	$\delta, \%$
Пластины Астро (Агфа)	0.10	5.4
	0.43	3.7
	0.96	5.1
Диапозитивные пластинки (Агфа)	0.15	8.1
	0.44	8.2

Из приведенных цифр видно, что чем меньше размер проявленных зерен, тем ниже точность метода.

Для проверки разработанного инструментального метода измерения фотографических шумов представляет интерес сравнить значения  $\sigma_s = \sqrt{(l-i)^2}$ , определенные на описанной установке, со значениями, рассчитанными непосредственно по микрофотограммам. Последние получились при том же самом сечении сканирующего светового пучка на микрофотометре МФ-2, переделанном в регистрирующий с помощью электронного самописца ЭПП-09. Приведем значения  $\sigma_s$ , определенные этими двумя методами для ряда почернений, полученных на пластинках Астро:

$D$	$\sigma_s$ измеренное	$\sigma_s$ расчетное
Буаль	0.68	0.68
0.20	0.75	0.75
0.50	0.55	0.54
0.72	0.39	0.36
0.91	0.29	0.26
1.26	0.14	0.11

Как видно из сравнения, измеренные и рассчитанные значения  $\sigma_s$  очень хорошо совпадают. Следует подчеркнуть, что, в то время как расчет  $\sigma_s$  по 100 точкам микрофотограммы чрезвычайно трудоемок, измерение  $\sigma_s$  на описанной установке занимает всего несколько минут.

Были проведены измерения шумов и отношения сигнал/шум ряда фотографических материалов при сканировании образца щелью с площадью  $a=100$  мк. Результат измерений представлен в таблице, где приведены следующие величины: максимальное значение шумов данного материала и соответствующее отношение сигнал/шум  $\psi$ , а также значение

\* В среднем 500 мк<sup>2</sup>.

шумов и отношение сигнал/шум при оптической плотности почернения  $D=1.0$ . Величины шумов даны в относительных единицах  $\frac{\sigma_m}{M}$ , %.

Материал	Условия проявления		В максимуме шумов		При $D=1$	
	проявитель по ГОСТу 2817-50	время, мин.	$\frac{\sigma_m}{M}$ , %	$\psi$	$\frac{\sigma_m}{M}$ , %	$\psi$
Пластинки диапозитивные (Агфа)	№ 1	4	4.0	8.2	1.4	56
Пластинки Астро (Агфа) . . . . .	№ 2	10	7.6	3.3	2.4	30
Кинопленка Ам-1 . . . . .	№ 2	10	4.3	7.2	1.0	83
Кинопленка А-2 . . . . .	№ 2	10	7.6	1.8	1.9	32
Аэропленка панхроматическая . .	№ 1	6	8.1	1.7	2.1	29

Примерные результаты измерений для отдельного образца, в данном случае пластины Астро, приведены на рис. 5, где изображены зависимости величины шумов и отношения сигнал/шум от плотности почернения, измеренные при площади сканирующей щели  $a=100 \text{ мк}^2$ .

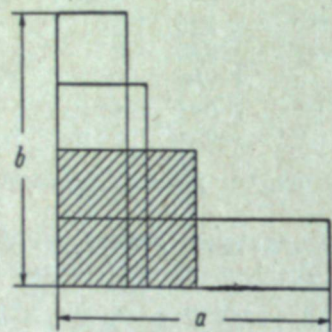


Рис. 4. Формы сканирующей щели.

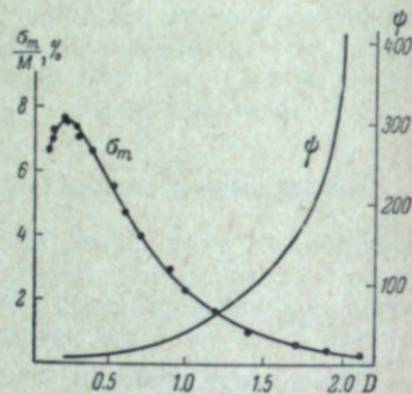


Рис. 5. Зависимость фотографических шумов и отношения сигнал/шум от плотности почернения для пластинок Астро, Агфа.

Подробное обсуждение результатов исследования различных фотографических материалов сделано в других публикациях.

В заключение авторы благодарят проф. В. Л. Крейдера за ряд полезных советов, которые были использованы при проведении данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. A. Jones, N. J. Deisch, J. Frankl. Inst., 190, 657, 1920.
2. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. фотогр., 1, 86, 1951.
3. L. A. Jones, G. C. Higgins, JOSA, 41, 41, 1951.
4. L. A. Jones, G. C. Higgins, K. E. Stultz, JOSA, 45, 107, 1955.
5. L. A. Jones, G. C. Higgins, JOSA, 35, 435, 1945.
6. G. C. Higgins, K. F. Stultz, JOSA, 49, 925, 1959.
7. J. A. Eyer, Applied Spectroscopy, 14, 4, 1960.
8. A. Marriage, E. Pitts, JOSA, 46, 1019, 1956.
9. H. J. Zweig, G. C. Higgins, D. L. Mac Adam, JOSA, 48, 926, 1958.

С. Б. ГУРЕВИЧ, И. И. БРЕЙДО, Г. А. ГАВРИЛОВ

### ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ПРОЯВЛЕННЫХ ЗЕРЕН И ЗАВИСИМОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ШУМОВ ОТ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПОЧЕРНЕНИЯ

Интерес к функции распределения случайных отклонений коэффициента пропускания и оптической плотности фотографических негативов проявляется уже в течение нескольких десятилетий. Он вызван практической важностью этой функции, от характера которой зависит оценка среднеквадратичного отклонения от средней величины коэффициента пропускания и оптической плотности.

Селвин [1] предположил, что в эмульсионном слое имеет место случайное распределение зерен, подчиняющееся формуле Гаусса. Исходя из этого предположения и уравнения [2]

$$D = 0.434m'a, \quad (1)$$

где  $m'$  — число проявленных зерен со средней площадью проекции  $a$ , можно вывести закон постоянства при данной оптической плотности и для данного фотографического материала соотношения

$$G = \sigma_D \sqrt{A}, \quad (2)$$

где  $A$  — площадь сканирующего пятна.

Это положение часто называют законом Селвина. Предположение, что случайные отклонения числа проявленных зерен от среднего значения подчиняются функции распределения Гаусса, высказывалось и многими другими авторами [3—5], большинство которых, пользуясь соотношением (1), приходило к выводу о справедливости распределения Гаусса и для случайных отклонений оптической плотности проявленного фотографического материала.

Случайное гауссово распределение зерен ведет к известной зависимости между средним числом зерен  $\bar{m}'$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{m'}$

$$\sigma_{m'} = \sqrt{\bar{m}'}. \quad (3)$$

Хотя в одной из работ [6] среди возможных функций распределения рассматривались также биномиальное и пуассоново распределение, однако для практических расчетов использовалось только гауссово распределение и следующая из него формула (3).

Имеются, однако, достаточно серьезные основания для того, чтобы считать неправильным применение распределения Гаусса к рассматриваемому случаю.

Рассмотрим вероятную картину создания проявленных зерен в результате воздействия квантов света. Будем считать справедливыми предположения, принятые другими авторами, а именно, что различия в размерах проявленных зерен не существенны и ими можно пренебречь [3,5] и что каждое проявленное зерно является абсолютно непрозрачным [3]. Рассмотрим вначале «одноярусный» слой эмульсии, т. е. такой слой, в котором по высоте уместается не более одного проявленного зерна. Заметим, что при достаточно большом количестве световых квантов можно достичь такого результата, что все  $M$  кристаллов галоидного серебра на данном сканируемом участке площадью  $A$  окажутся проявленными. При некотором меньшем количестве квантов количество проявленных зерен в разных опытах должно флуктуировать вокруг некоторой величины  $\bar{m}$ , а количество непроявленных эмульсионных кристаллов — соответственно вокруг величины  $M - \bar{m}$ . Нетрудно видеть, что вероятность  $p$  того, что в данном конкретном опыте зерно окажется проявленным, равна  $\frac{\bar{m}}{M}$ , а вероятность  $q$  того, что эмульсионный кристалл не проявится, равна  $\frac{M - \bar{m}}{M} = 1 - \frac{\bar{m}}{M}$ . Можно считать, что опыт состоит в  $M$  испытаниях возникновения для каждого кристалла одного из двух событий: проявления его или непроявления. Такой опыт точно соответствует схеме Бернулли, и вероятность того, что данное событие (возникновение проявленного зерна) из  $M$  раз произойдет в  $m$  случаях, определяется из выражения

$$P_M(m) = \frac{M!}{m!(M-m)!} p^m (1-p)^{M-m}. \quad (4)$$

Нетрудно показать для этого случая, что величина среднего значения  $m$  составляет  $\bar{m} = Mp$ , тогда как величина среднеквадратичного отклонения  $\sigma_m$  определяется соотношением

$$\sigma_m = \sqrt{m - \bar{m}^2} = \sqrt{Mpq} = \sqrt{\frac{\bar{m}(M - \bar{m})}{M}}. \quad (5)$$

Как видно, это выражение отличается от такого же, полученного при помощи функций распределения Гаусса или Пуассона, тем, что под корнем имеется дополнительный множитель  $\frac{M - \bar{m}}{M}$ . Последняя величина близка к единице, а формула (5) к формуле (3) лишь в том случае, когда  $\bar{m} \ll M$ , т. е. при малом числе проявленных зерен.

Заметим, что распределение Пуассона вообще справедливо при больших  $M$  и малых  $p = \frac{\bar{m}}{M}$ . Соответственно величины  $Mp = \bar{m}$  должны быть существенно меньшими  $M$ . Распределение Гаусса также справедливо при малых  $p$  и достаточно больших  $\bar{m}$ . Из условия  $p \ll 1$  следует, что  $\bar{m} \ll M$ . Очевидно, что последнее условие в фотографии выполняется в практически редко реализуемых случаях. Действительно, величине  $\bar{m} = 0.1M$  соответствует оптическая плотность  $D = 0.046$ , в то время как оптическая плотность вуали оказывается для большинства фотографических материалов существенно большей. Участку характеристической кривой с наиболее употребительными значениями плотностей соответствует диапазон от  $0.3$  до  $0.95M$  ( $D$  от  $0.15$  до  $1.3$ ), и как раз в этом диапазоне не удовлетворяются условия, при которых возможно применение функций распределения Пуассона и Гаусса. Таким образом, для рассмотренного случая справедливо соотношение (5), а не (3).

Если мы имеем дело с реальным «многоярусным» эмульсионным слоем, то и в этом случае сделанные выводы остаются в силе. Действительно, максимальное количество проявленных зерен при этом увеличивается в число «ярусов», но в такое же число раз увеличивается и величина  $m$ . Таким образом, диапазон вероятностей, что эмульсионный кристалл окажется проявленным, останется тем же, что и в одноярусном слое. Следовательно, и применительно к многоярусному слою не могут использоваться функции распределения Пуассона и Гаусса.

Следует, далее, подчеркнуть, что при фотометрировании может оцениваться лишь число непокрытых проявленных зерен и флуктуации именно этого числа, а не всех проявленных зерен. Соответственно экспериментально проверяемую статистическую картину можно представить как  $M$  испытаний возникновения одного из двух событий: под одним понимается наличие в столбике с основанием, равным проекции кристалла среднего размера, и высотой, равной высоте слоя, хотя бы одного проявленного зерна; под другим — отсутствие в указанном столбике хотя бы одного проявленного зерна. Рассмотренная картина требует дополнительного упрощения, заключающегося в том, что все зерна, перекрытые больше чем наполовину, считаются полностью непокрытыми, а перекрытые менее чем наполовину — совсем непокрытыми. При этих условиях многоярусный эмульсионный слой обладает такими же статистическими свойствами, как и одноярусный.

Из приведенных соображений вытекает, что из трех функций распределения — биномиальной, Пуассона и Гаусса — наиболее близкой к действительной функции распределения отклонения числа проявленных зерен от средней величины является биномиальная. Соответственно для оценки фотографических шумов следует пользоваться выражением (5). Анализируя это выражение, можно заметить, что с увеличением  $\bar{m}$  (а соответственно и оптической плотности) шумы сперва растут, достигают максимума и затем уменьшаются (рис. 1, 1). Очевидно, что максимум расчетной кривой должен соответствовать  $\bar{m} = \frac{1}{2}M$  и что в максимуме шумы численно равны

$$\sigma_{m_{\max}} = \frac{1}{2} \sqrt{M}. \quad (6)$$

Заметим далее, что при увеличении площади сканирующего пятна  $A$  величины  $M$  и  $\bar{m}$  возрастают пропорционально увеличению площади. Нетрудно показать, что при данном  $\frac{\bar{m}}{M}$

$$\frac{\sigma_m}{\sqrt{A}} = \text{const}. \quad (7)$$

Действительно, если считать, что на единицу поверхности приходятся  $M'$  и  $\bar{m}'$  максимального и среднего для данной экспозиции чисел проявленных зерен, то в сканируемом элементе площадью  $A$  таких зерен окажется  $M = M'A$  и  $\bar{m} = \bar{m}'A$ . Тогда

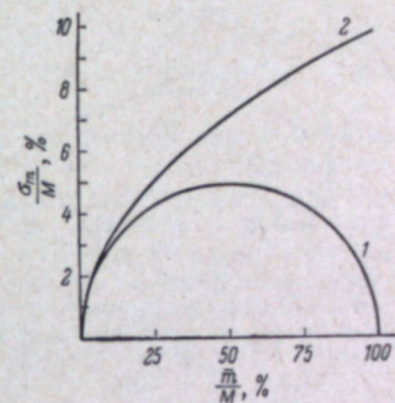


Рис. 1. Зависимость шумов  $\sigma_m$  от числа проявленных зерен согласно биномиальному распределению (1) и распределению Гаусса и Пуассона (2).

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\bar{m}'}{M'} (M' - \bar{m}')} A = \sigma_m' \sqrt{A}.$$

Так как для данной эмульсии при заданном коэффициенте пропускания  $\sigma_m' = \text{const}$ , то справедлива формула (7). Нетрудно видеть, что в соответствии с распределением Пуассона или Гаусса характер зависимости  $\sigma_m$  от  $\bar{m}$  (рис. 1, 2) отличался бы от того, который имеет место при биномиальном распределении, но зависимость шумов от площади тем не менее удовлетворяла бы формуле (7).

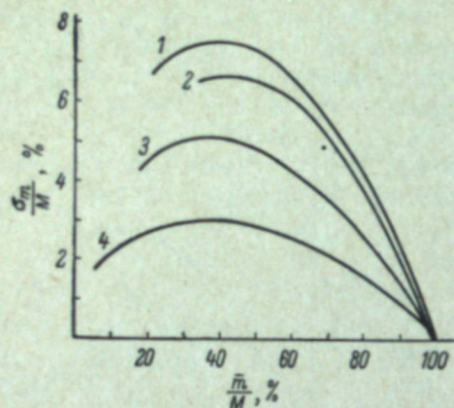


Рис. 2. Зависимость шумов  $\sigma_m$  от относительного числа проявленных зерен для разных фотографических материалов.

1 — пластинки Астро, Агфа; 2 — киноплёнка А-2; 3 — киноплёнка АМ-1; 4 — диапозитивные пластинки фирмы Агфа.

Результаты измерений для фотографических пластинок Астро и диапозитивных пластинок фирмы Агфа, а также отечественных киноплёнок А-2 и АМ-1 приведены на рис. 2. Из этого рисунка видно, что зависимость шумов фотографических материалов от оптической плотности достаточно хорошо описывается биномиальным распределением и не согласуется с распределением Гаусса. Необходимо, однако, отметить, что, несмотря на качественное соответствие экспериментальных и теоретических кривых, они не вполне совпадают: экспериментальные кривые имеют максимум, несколько сдвинутый в область плотностей, меньших  $D = 0.3$  ( $\bar{m} = \frac{1}{2} M$ ), и правые падающие ветви, более пологие, чем у симметричных теоретических кривых. Частично такое отступление может быть объяснено рассеянием света в слое, которое особенно велико при большем числе проявленных зерен.

Указанное расхождение между экспериментальными и теоретическими кривыми не является принципиальным и не может изменить выводы о соответствии экспериментального хода зависимости фотографических шумов от оптической плотности биномиальному распределению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. W. H. Selwin, Phot. J., 75, 571, 1935.
2. L. Silberstein, A. P. H. Triwelli, JOSA, 28, 441, 1938.
3. H. J. Zweig, G. C. Higgins, D. L. Mac Adam, JOSA, 48, 926, 1958.
4. E. H. Linfoot, J. Phot. Sci., 7, 148, 1959.
5. J. A. Eyer, Applied Spectroscopy, 14, 4, 1960.
6. J. H. Webb, JOSA, 45, 379, 1955.
7. С. Б. Гуревич, И. И. Брейдо, Г. А. Гаврилов, Настоящий сборник, стр. 163.

Т. М. ЛЕВЕНБЕРГ

## О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАКРОЗЕРНИСТОСТИ ПОЧЕРНЕНИЙ ФОТОГРАФИЧЕСКИМ ПРОЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Фотографический проекционный метод определения макрозернистости почернений, предложенный Ю. Н. Гороховским [1] и разработанный им и автором настоящей статьи [2], заключается в следующем. Исследуемое почернение помещают в специальный увеличитель (гранулометр) и печатают с него на фотографической бумаге или пленке позитивные изображения при разных масштабах увеличения, образующих геометрическую прогрессию. Экспозиции при печати подбираются так, чтобы плотности всех отпечатков были одинаковы и равны 0.5. Такой набор примыкающих друг к другу отпечатков называется гранулограммой.

Гранулограммы различных почернений, независимо от плотности последних, также должны иметь одинаковую плотность.

Готовые гранулограммы оцениваются при определенных условиях рассматривания, и наблюдатель находит первое, в порядке возрастания масштабов увеличения, поле гранулограммы, на котором зернистость становится уже отчетливо заметной (мешающей), т. е. за критерий зернистости принимается верхний предельный масштаб увеличения [3]. Оценка гранулограмм производится несколькими наблюдателями, и по среднему из всех оценок значению  $M_{пр}$  определяют фактор зернистости

$$G = \frac{100}{M_{пр}}.$$

Использование при печати гранулограмм шкалы масштабов увеличения, построенной по геометрической прогрессии, обеспечивает одинаковую относительную ошибку определения фактора зернистости при различных значениях  $M_{пр}$ .

Естественно ожидать, что свойства фотографического материала, применяемого в качестве «детектора» макрозернистости, будут влиять на результаты измерений: чем более контрастен этот материал, тем при меньших масштабах увеличения будет обнаруживаться заметная на глаз неоднородность фотографического почернения. Поэтому при определении фактора зернистости необходимо пользоваться фотографическим материалом с заранее выбранной степенью контрастности: фотографической бумагой с заданным средним градиентом  $g$  или пленкой, проявленной до определенного значения  $\gamma$ .

Точность фотографического проекционного метода определяется в основном точностью оценки гранулограмм. Многолетний опыт показывает, что при исправной работе гранулометра и соблюдении условий, указан-

Значения фактора зернистости, полученные в результате оценки различными наблюдателями

Номер почернения	Наблюдатель										$\frac{\sum_{k=1}^5 G_k}{5}$	$\frac{\Delta G}{G}, \%$
	1-й		2-й		3-й		4-й		5-й			
	$G_1$	$\frac{\Delta G_1}{G_1}, \%$	$G_2$	$\frac{\Delta G_2}{G_2}, \%$	$G_3$	$\frac{\Delta G_3}{G_3}, \%$	$G_4$	$\frac{\Delta G_4}{G_4}, \%$	$G_5$	$\frac{\Delta G_5}{G_5}, \%$		
1	35	7	24	9	30	6	26	3	40	3	31	12
2	12	12	10	4	13	2	12	10	18	14	13	12
3	17	5	11	11	16	10	12	6	21	12	15	20
4	17	9	10	7	14	8	12	10	18	6	14	16
5	21	3	16	6	20	4	20	2	26	4	20	10
6	22	4	18	10	22	6	20	4	34	8	23	13
7	18	3	14	10	18	7	16	15	23	11	18	20
8	20	7	15	10	20	6	17	12	27	6	20	17
9	18	9	13	6	16	6	15	11	24	12	17	20
10	30	2	25	10	30	10	26	4	37	9	30	14
11	17	7	14	6	17	7	16	11	23	10	17	16
12	23	6	22	10	26	7	22	7	30	0	25	14
13	18	9	14	15	19	7	17	5	23	10	18	15
14	17	4	11	10	16	8	12	7	20	10	15	18
15	35	3	35	7	35	3	35	11	40	0	35	8
Средняя относительная ошибка, %		6		9		6.5		8		7.5		15

и их относительная ошибка

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\frac{1}{60} \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{12} |G_{ik} - G|}{\bar{G}}$$

Так же как и при печати гранулограмм на макете гранулометра, относительная ошибка  $\frac{\Delta G}{G}$ , подсчитанная по оценкам всех наблюдателей, составляет 15%. Таким образом, применение более совершенного прибора не привело к уменьшению этой ошибки.

Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что ошибки  $\frac{\Delta G_k}{G_k}$  для отдельных наблюдателей значительно меньше 15%; они колеблются от 6 до 9% и среднее значение  $\frac{\Delta G_k}{G_k}$  для всех пяти наблюдателей составляет 7%. При этом оценки 5-го наблюдателя всегда выше оценок 3-го, оценки 3-го и 1-го наблюдателей очень близки между собой, но, как правило, выше оценок 4-го наблюдателя, а эти последние выше оценок 2-го наблюдателя.

Анализ результатов, полученных за несколько лет работы, показывает, что расхождения между оценками различных наблюдателей носят не случайный, а систематический характер: если один наблюдатель дает более высокие значения  $G$ , чем другой, то это всегда повторяется в разное время и при оценке гранулограмм, относящихся к различным опытам.

Такие систематические расхождения связаны, очевидно, с индивидуальными различиями в остроте зрения и, возможно, в индивидуальных

ных выше, гранулограммы одного и того же почернения, даже напечатанные с различных его участков, неотличимы. Таким образом, если только гранулограмма не имеет каких-либо дефектов (пятна, царапины, неравномерность по плотности, нерезкость), сам процесс ее получения никаких ощутимых ошибок в определение фактора зернистости не вносит, и точность этого определения практически целиком обуславливается случайными ошибками, допускаемыми наблюдателями при оценке гранулограмм.

Наличие на гранулограмме царапин и небольшие различия в плотности отдельных полей приводят к неуверенности оценки и увеличению случайных ошибок, а нерезкость и наличие посторонней структуры — к систематическим ошибкам, величина которых трудно поддается учету.

Впервые ошибка метода была определена по результатам оценки гранулограмм, напечатанных на построенном нами первоначально макете гранулометра [2].

Результаты оценки 30 гранулограмм показали, что относительная ошибка, колеблясь в отдельных случаях от 7 до 22% (последнее в трех случаях), в среднем составляет 14%. Более тщательное изучение гранулограмм, давших наибольшую ошибку, показало, что все они обладали какими-либо из указанных выше дефектов.

Позднее, когда был построен гранулометр УКП-5 [4], представило интерес вновь проверить точность метода. Так как гранулограммы, напечатанные на этом технически более совершенном приборе, были лучше выполнены, можно было ожидать, что ошибка будет меньше.

Было отобрано 15 гранулограмм, сделанных с почернений, принадлежавших трем типам отечественных кинонегативных пленок: А, В и МЗ. Все почернения были проявлены до  $\gamma=0.65$ , но имели различную оптическую плотность: от  $D_{\phi}=0.6$  до  $D_{\phi}=1.4$ .

Для печати использовалась матовая бумага Унибром со средним градиентом 0.9.

Гранулограммы оценивались пятью наблюдателями четыре раза в различные дни. Каждый день наблюдатель делал три оценки (табл. 1). Таким образом, каждая гранулограмма была оценена 60 раз и за окончательное значение фактора зернистости принимали среднее из 60 оценок (в старых опытах [2] общее число оценок равнялось 45).

В табл. 1 представлены средние значения фактора зернистости  $G_k$ , вычисленные по определениям каждого наблюдателя,

$$G_k = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} G_{ik} \quad \text{при } k=1, 2, \dots, 5$$

и соответствующие им относительные ошибки

$$\frac{\Delta G_k}{G_k} = \frac{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} |G_{ik} - G_k|}{G_k} \quad \text{при } k=1, 2, \dots, 5,$$

где  $k$  — номер наблюдателя, а  $i$  — номер определения.

В ней же приведены средние значения фактора зернистости  $\bar{G}$ , вычисленные по определениям всех наблюдателей,

$$\bar{G} = \frac{1}{60} \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^{12} G_{ik}$$

представлениях каждого наблюдателя о том, какую картину следует принимать за критерий, соответствующий верхнему предельному масштабу увеличения.

Таким образом, цифра 15% характеризует систематические расхождения между отдельными наблюдателями — так называемую систематическую личную разность. Случайная же ошибка оценки для одного наблюдателя или для данной группы наблюдателей, характеризующая воспроизводимость метода, не превосходит 7%; с этой точностью отдельный наблюдатель или группа наблюдателей будут воспроизводить свои показания при повторных оценках.

Представляло интерес выяснить, сказываются ли различия в остроте зрения и в индивидуальных критериях лишь на абсолютных значениях фактора зернистости или же различные наблюдатели систематически устанавливают и разные соотношения между этими значениями.

С этой целью по данным табл. 1 были вычислены относительные значения фактора зернистости  $G_{k \text{ отн.}}$ , причем для каждого наблюдателя за единицу принимали величину фактора зернистости почернения № 2. Полученные данные сведены в табл. 2, из которой видно, что относительные значения фактора зернистости расходятся у различных наблюдателей значительно меньше, чем абсолютные; ошибка в их определении  $\frac{\Delta G_{\text{отн.}}}{G_{\text{отн.}}}$  составляет  $\sim 7\%$ , т. е. не превосходит случайной ошибки оценки. Это очень важно, так как при исследовании многих вопросов существенны именно соотношения между значениями фактора зернистости, а не его абсолютная величина.

Таблица 2

Относительные значения фактора зернистости  $G_{k \text{ отн.}}$  для отдельных наблюдателей, рассчитанные по данным табл. 1

Но- мер почер- нения	Наблюдатель					$\bar{G}_{\text{отн.}} = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 G_{k \text{ отн.}}$	$\frac{\Delta G_{\text{отн.}}}{\bar{G}_{\text{отн.}}}, \%$
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й		
1	2.9	2.4	2.3	2.2	2.2	2.5	8
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0
3	1.4	1.1	1.2	1.0	1.2	1.2	10
4	1.4	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	12
5	1.8	1.6	1.5	1.7	1.4	1.6	8
6	1.9	1.8	1.6	1.7	1.6	1.7	4
7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.4	4
8	1.7	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5	5
9	1.5	1.3	1.2	1.2	1.4	1.3	7
10	2.5	2.5	2.4	2.2	2.0	2.3	6
11	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	3
12	1.9	2.2	2.0	1.8	1.7	1.9	5
13	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	4
14	1.4	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	10
15	2.9	3.5	2.7	2.9	2.2	2.8	6
Средняя относительная ошибка, %							7

Примененный нами прием исключения влияния различий в остроте зрения путем введения относительных величин не нов; он использовался Джонсом и Дишем [3] и Лаури [5], но предельное расстояние рассматривания или соответственно предельный масштаб увеличения вычислялись по отношению к этим же величинам, определенным для какого-либо растра.

Ромер [6] и Залеский [7] предлагают повысить точность фотографического проекционного метода путем применения эталонного поля сравнения, представляющего собой изображение зернистой структуры некоторого эталонного почернения при масштабе увеличения, принятом за предельный. Поле сравнения впечатывается над каждым полем гранулограмм таким образом, чтобы граница по возможности не была заметна. Авторы нашли, что этот прием значительно повышает точность метода, так как устраняет индивидуальные разногласия между наблюдателями при выборе «предельного поля», вызываемые тем, что каждый наблюдатель имеет свой критерий, который в свою очередь изменяется во времени и по мере утомления наблюдателя.

Не говоря уже о том, что впечатывание эталонного поля сравнения вдвое увеличивает объем работы, само его применение кажется нам неравномерным. Систематические различия в абсолютных значениях фактора зернистости, определяемых разными наблюдателями, вызваны не только тем, что каждый наблюдатель по-своему представляет себе, какой должна быть картина зернистости при предельном масштабе увеличения, но и различиями в остроте зрения, вследствие чего то поле, которое для одних является пороговым, для других может казаться или слишком отчетливо зернистым, или, наоборот, вполне равномерным. В результате вместо унификации критерия фактически будут как раз введены различные критерии.

Кроме того, характер зернистой структуры даже при предельном масштабе увеличения различен у разных почернений: встречаются структуры с крупными мало контрастными элементами (преимущественно при малых  $D$  и  $\gamma$ ) и с мелкими высококонтрастными элементами (при высоких  $D$  и  $\gamma$ ). Такие различия между образцом и эталоном будут ощущаться как наблюдателями со средним уровнем остроты зрения, для которых масштаб увеличения эталона действительно будет предельным, так и в особенности теми наблюдателями, которые обладают несколько повышенной остротой зрения и для которых он окажется выше предельного.

По этим причинам использование эталонного поля, уменьшая расхождения между определениями отдельных наблюдателей, может, по нашему мнению, ввести систематическую ошибку.

Нам кажется, что в целях повышения точности определения численных значений фактора зернистости правильнее использовать относительные значения этой величины

$$G_{\text{отн.}} = \frac{G}{G_0},$$

где  $G$  — фактор зернистости исследуемого образца, а  $G_0$  — фактор зернистости эталонного образца, определенный по гранулограмме этого образца, полученной в тех же условиях и оцененной той же группой наблюдателей, что и гранулограмма исследуемого почернения. Такой прием снизит расхождения между численными значениями фактора зернистости, получаемыми в различных лабораториях, с 14 до 7%, не внося в оценку каких-либо искажений и не увеличивая сколько-нибудь значительно объем работы.

В качестве эталона зернистости можно применить стандартные образцы почернений, изготовленные одновременно и разосланные по разным лабораториям, или искусственно изготовленные модели. Было предложено [8], например, получать такие модели путем фотографирования случайных всплесков на экране катодной трубки; эти модели представляют собой темные круги определенного размера, распределенные по поверхности по закону случая. Такой процесс можно хорошо стандартизовать.



## Выводы

1. Систематические расхождения между абсолютными значениями фактора зернистости, устанавливаемыми для каждого отдельного почернения разными наблюдателями (систематическая личная разность), достигают в среднем  $\pm 15\%$  от измеряемой величины. В то же время случайные ошибки оценки разных почернений отдельным наблюдателем или группой наблюдателей не превосходят  $\pm 8\%$ .

2. Соотношения между значениями фактора зернистости разных почернений устанавливаются разными наблюдателями с точностью до 7%. Поэтому в целях лучшей воспроизводимости результатов, получаемых в различных лабораториях, рекомендуется пользоваться относительными значениями фактора зернистости, представляющими собой отношения факторов зернистости исследуемых почернений к фактору зернистости некоторого эталонного почернения, определяемому в тех же условиях той же группой наблюдателей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Гороховский. Методы фотографической сенситометрии. Госкиноиздат, М., 80, 88, 1948.
2. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. фотогр., I, 86, 1951.
3. L. A. Jones, N. Deisch, J. Frankl. Inst., 190, 657, 1920.
4. Ю. Н. Гороховский, Б. М. Левин, Усп. научн. фотогр., IV, 117, 1955.
5. E. M. Lowry, JOSA, 26, 65, 1936.
6. В. Ромер, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 91, 1962.
7. А. Залеский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 6, 274, 1961.
8. Y. C. Marchart a. P. L. P. Dillon, JOSA, 51, 641, 1961.

В. П. БАРАНОВА, Ю. Н. ГОРОХОВСКИЙ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА ПОЧЕРНЕНИЙ

### Постановка задачи

Сенситометрические свойства фотографического материала зависят от ряда факторов, среди которых далеко не последнее место занимает фотометрический эквивалент почернений [1] — отношение поверхностной концентрации серебра в фотографическом изображении к диффузной оптической плотности последнего.

В данном исследовании на ряде современных фотографических материалов изучено, как зависит фотометрический эквивалент от оптической плотности почернения и от степени проявленности фотографического материала, на котором оно получено, и как фотометрический эквивалент связан с размерами серебряных зерен, образующих почернение.

Все исследование выполнялось нами на четырех черно-белых негативных материалах (фототехническая пленка Микрат-200, импортная аэропленка типа Супер XX, роликовая фотопленка HP-S фирмы Ильфорд и аэропленка Панхром X), средние размеры площади проекции  $x_{AgHal}$ : эмульсионных кристаллов которых, определенные обычным микрофотографическим методом, были соответственно равны 0.15, 0.45, 0.75 и 1.00 мк<sup>2</sup>.

Пленки экспонировались на дисковом сенситометре, а не на клиновом, во избежание выявления на сенситограмме структуры экспозиционного клина.

Фотометрический эквивалент находили по формуле  $P = \frac{c_{Ag}}{D_{\text{д}}}$ , где поверхностная концентрация серебра  $c_{Ag}$  есть отношение массы серебра (в г) к площади поверхности проявленного слоя (в м<sup>2</sup>), а  $D_{\text{д}}$  — диффузная оптическая плотность его.

Определение количества серебра осуществлялось колориметрическим методом, предложенным Файглем [2] и впервые примененным к анализу серебра в фотографических почернениях Н. Н. Шишкиной [3]. Метод основан на применении парадиметиламинобензилиденроданина, образующего с ионами серебра в кислой среде соединение красно-фиолетовой окраски, насыщенность цвета и оптическая плотность которого меняются в зависимости от концентрации ионов серебра. Чувствительность этого метода порядка 0.04 γ/мл, а точность составляет от 6.0 до 1.2% для концентраций серебра в диапазоне 0.15—2.00 γ/мл; указанный диапазон объемных концентраций серебра наиболее характерен для условий ана-

лиза фотографических почернений на пленках. Анализ подвергался участок почернения площадью 20 мм<sup>2</sup>.

Для получения значений оптических плотностей почернений применялся в основном фотоэлектрический денситометр ДФЭ-10, где фотоэлемент приводится в контакт с образцом почернения, что дает результаты, совпадающие с диффузной оптической плотностью в пределах точности измерений [4]. Последняя составляет  $\pm 0.01$  при измерении оптических плотностей до 2.3 и  $+0.02$  при измерении оптических плотностей выше 2.3. Оптические плотности, превышающие 3.0, измерялись на поляризационном денситометре Мартенса (точность  $\pm 0.03 \div 0.04$ ), с помощью которого производился и периодический контроль данных, полученных на денситометре ДФЭ-10.

Погрешность определения величины фотометрического эквивалента для плотностей, превышающих 0.1, составляет 2—8%.

Все четыре материала проявлялись в проявителях №№ 1 и 2 по ГОСТу 2817-50. Кроме того, пленки Панхром X и типа Супер XX проявлялись также и в глициновом физическом проявителе [5] с предварительным фиксированием.

### Зависимость фотометрического эквивалента от оптической плотности почернения

В первой серии опытов для каждого из четырех фотографических материалов получали по пять сенситограмм, проявленных в проявителе № 1 в течение 2, 4, 8, 16 и 32 мин. Далее определяли на полях сенситограмм указанным выше методом поверхностные концентрации металлического серебра и вычисляли фотометрический эквивалент.

Результаты этих опытов представлены на рис. 1—3, на каждом из которых кривые  $P=f(D_{\Phi})$  относятся к различным временам проявления, при которых коэффициент контрастности пленок менялся в следующих пределах: Микрат-200 — от 1.8 до 2.3, типа Супер XX — от 1.5 до 1.8, Панхром X — от 1.3 до 1.8 и HP-S — от 0.5 до 0.9. Мы видим, что у каждого из четырех материалов при постоянном времени проявления фотометрический эквивалент уменьшается с ростом плотности (увеличение плотности в данном случае происходит вследствие возрастания экспозиции); эта закономерность выражена наиболее сильно у пленки HP-S.

Таблица 1

Значения фотометрического эквивалента (г/м<sup>2</sup>) для различно экспонированных полей четырех материалов, проявленных в проявителе № 1 в течение двух сильно различающихся времен

t <sub>пр.</sub> мин.	Пленки											
	Микрат-200			типа Супер XX			Панхром X			HP-S		
	$\tau$	$D_{\Phi}$	P	$\tau$	$D_{\Phi}$	P	$\tau$	$D_{\Phi}$	P	$\tau$	$D_{\Phi}$	P
2	1.8	0.23	1.6	1.5	0.40	3.4	1.3	0.42	3.4	0.6	0.23	4.7
		0.64	1.4		0.70	2.7		0.84	3.0		0.34	4.0
		1.14	1.2		1.14	2.2		1.26	2.4		0.68	3.0
	2.3	1.72	1.2	2.04	1.8	1.49	2.2	0.83	2.3	0.8	0.88	4.7
		0.87	2.0	0.78	3.4	0.94	3.9	0.98	4.5			
		1.59	1.5	0.84	3.1	1.10	3.8	1.17	4.2			
32	2.33	1.3	1.26	2.7	2.08	3.1	1.58	3.7	0.8	1.58	3.7	
	2.91	1.2	2.39	1.8	2.54	2.8	2.05	3.2				
			2.92	1.7								

а наименее — у Микрат-200. В табл. 1 помещены значения фотометрического эквивалента ряда полей сенситограмм разных материалов, проявленных в течение 2 и 32 мин. в проявителе № 1.

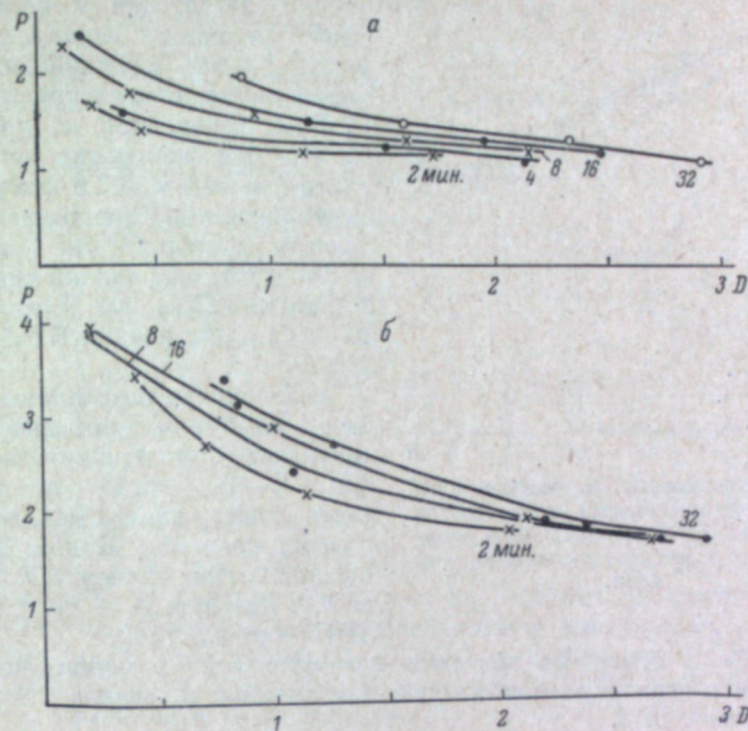


Рис. 1. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от плотности последнего для пленки Микрат-200 (а) и для пленки типа Супер XX (б), проявленных в проявителе № 1 в течение различного времени.

Если принять утверждение Эггерта и Кюстера [6], что фотометрический эквивалент в достаточно широких пределах линейно связан с диаметром серебряных зерен, то, исходя из приведенного выше соотношения размеров эмульсионных кристаллов изучавшихся нами материалов и считая, что это соотношение сохранится и для размеров проявленных зерен серебра, можно было бы ожидать, что наибольшие значения фотометрического эквивалента должны характеризовать пленку Панхром X, несколько меньшие — HP-S, далее должна стоять пленка типа Супер XX и, наконец, Микрат-200. В результате наших опытов получилось, что действительно пленка Микрат-200 характеризуется наименьшими значениями фотометрического эквивалента (1.1—2.4), но величины фотометрического эквивалента пленки HP-S (2.8—5.2) существенно выше, чем пленки Панхром X (2.0—4.4), а не наоборот. Это отклонение от ожидаемого объясняется тем, что при проявлении пленки HP-S происходит хо-

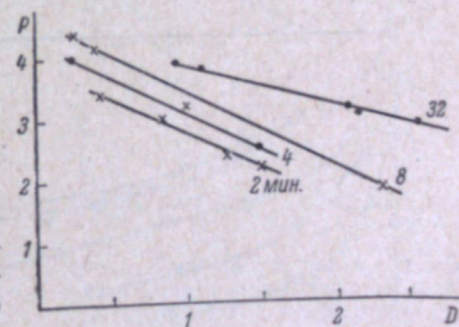


Рис. 2. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от плотности для пленки Панхром X, проявленной в проявителе № 1 в течение различного времени.

Значения фотометрического эквивалента ( $\text{г}/\text{м}^2$ ) для различно экспонированных полей четырех материалов, проявленных в проявителе № 2 в течение двух сильно различающихся времен,

$t_{\text{пр.}}$ мин.	Пленки											
	Микрат-200			типа Супер XX			Панхром X			HP-S		
	$\tau$	$D_{\Phi}$	$P$	$\tau$	$D_{\Phi}$	$P$	$\tau$	$D_{\Phi}$	$P$	$\tau$	$D_{\Phi}$	$P$
2	0.5	0.04	2.0	0.4	0.04	2.8	0.2	0.06	1.3	0.2	0.08	2.8
		0.26	1.4		0.10	2.3		0.23	1.3		0.11	2.5
		0.52	1.1		0.30	1.6		0.38	1.2		0.14	2.1
		0.72	0.9		0.46	1.4		0.79	1.0		0.18	2.1
		1.10	0.8		0.71	1.2					0.29	1.8
		1.36	0.7									
32	2.2	0.55	2.0	1.2	0.60	2.9	1.5	0.30	5.0	0.9	0.50	5.2
		2.04	1.4		1.22	2.3		1.51	3.6		0.93	4.7
		2.56	1.2		1.75	2.3		2.59	2.8		1.12	4.3
		3.30	1.1		2.36	2.1		2.78	2.9		1.44	4.0
		3.52	1.1		2.74	1.9					1.76	3.4
											2.06	3.2

значительно у пленок HP-S и Панхром X и совсем незначительно — у Микрат-200. В данном случае при возрастании плотности от 1.0 до 2.0 величина фотометрического эквивалента уменьшается следующим образом: для Микрат-200 на 15—18%, для пленки типа Супер XX на 20%, для Панхром X на 18—25%, для пленки HP-S на 28—30%.

О. В. Пясецкая и К. В. Вендровский [7] в свою очередь нашли, что у грубодисперсных пленок фото-

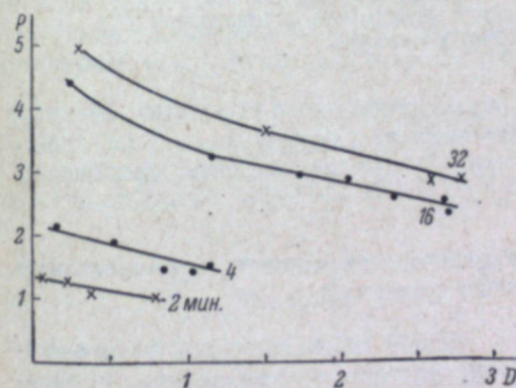


Рис. 5. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от плотности для пленки Панхром X, проявленной в проявителе № 2 в течение различного времени.

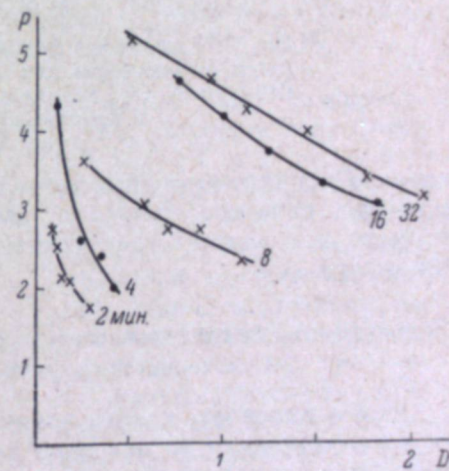


Рис. 6. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от плотности для пленки HP-S, проявленной в проявителе № 2 в течение различного времени.

рошо видимое в микроскоп слипание зерен серебра в большие комки и диаметр этих зерен оказывается значительно большим, чем у пленки Панхром X. Это слипание происходит у HP-S легче, чем у трех других пленок, вероятно, потому, что пленка HP-S очень неоднородна по размерам эмульсионных кристаллов.

При проявлении в проявителе № 1 и при изменении оптической плотности от 1.0 до 2.0 фотометрический эквивалент  $P$  уменьшается в следующих пределах: для Микрат-200 на 15—17%, для пленки типа Супер XX на 18—22%, для Панхром X на 20—25% и для пленки HP-S на 25—28%.

Аналогичные результаты получились и во второй серии опытов — при проявлении в проявителе № 2 (рис. 4—6), когда коэффициент контрастности пленок менялся в следующих пределах: Микрат-200 — от 0.5 до 2.2, типа Супер XX — от 0.4 до 1.2, Панхром X — от 0.2 до 1.5 HP-S — от 0.2 до 0.9.

В табл. 2 помещены значения фотометрического эквивалента ряда полей сенситограмм разных пленок, проявленных в течение 2 и 32 мин. в проявителе № 2.

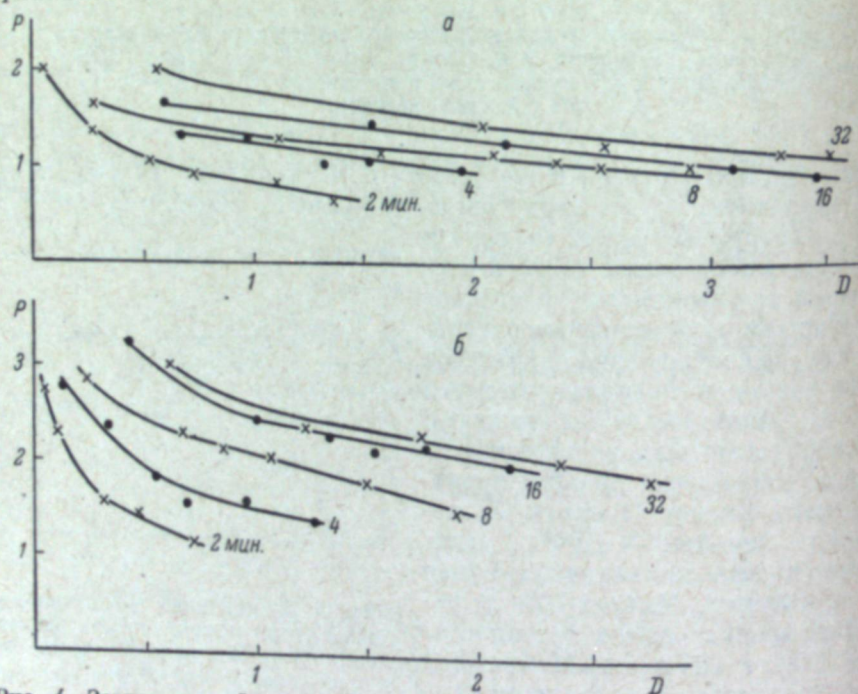


Рис. 4. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от плотности для пленки Микрат-200 (а) и для пленки типа Супер XX (б), проявленных в проявителе № 2 в течение различного времени.

Для всех четырех материалов при увеличении оптической плотности (экспозиции) фотометрический эквивалент уменьшается, причем наиболее

метрический эквивалент уменьшается на 30—40% при увеличении плотности на 1.0.

Таким образом, из наших данных следует, что в указанном диапазоне оптических плотностей фотометрический эквивалент уменьшается с ростом плотности практически в одинаковой степени для почернений, полученных в столь различных по составу и характеру действия проявителях, как проявители №№ 1 и 2 по ГОСТу 2817—50.

Для двух пленок, проявленных в физическом проявителе, получились те же закономерности. Как видно из рис. 7, в этом случае при увеличении плотности почернения значения фотометрического эквивалента обоих материалов при всех временах проявления падают и особенно резко у пленки типа Супер ХХ и, при малых плотностях (от 0.1 до 0.8), у пленки Панхром Х. При изменении оптической плотности почернений пленки типа Супер ХХ от 0.1 до 1.6 фотометрический эквивалент уменьшается на 50—60%. При увеличении оптической плотности при всех временах проявления пленки Панхром Х фотометрический эквивалент

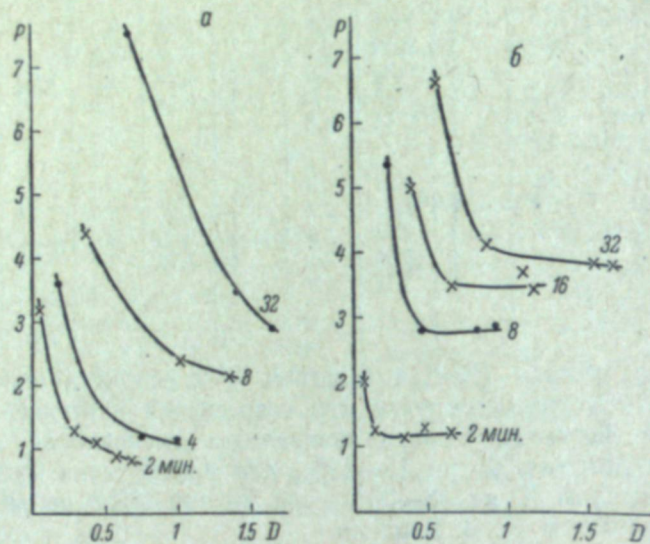


Рис. 7. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от плотности для пленки типа Супер ХХ (а) и Панхром Х (б), проявленных в физическом проявителе в течение различного времени.

вначале падает весьма значительно, но по достижении величины, соответствующей полю сенситограммы, экспозиция на котором была 2 лк·сек., практически остается постоянным (рис. 7) при дальнейшем увеличении плотности.

#### Зависимость фотометрического эквивалента от степени проявленности фотографического материала

Чтобы выяснить, каково влияние степени проявленности фотографического материала на значения фотометрического эквивалента, необходимо было исключить влияние экспозиции на величину фотометрического эквивалента. С этой целью мы выбрали из наших экспериментальных данных для каждой пленки те величины фотометрического эквивалента, которые характеризовали поля сенситограмм, экспонированные одинаково, но проявленные в течение разного времени — от 2 до 32 мин. Экспозиция при этом менялась от 0.01 до 28 лк·сек. Результаты представлены на рис. 8—10.

Из графиков видно, что в разных проявителях длительность проявления различно влияет на величину фотометрического эквивалента. Изменение продолжительности проявления в проявителе № 1 при данной экспозиции практически совершенно не сказывается на величине фотометрического эквивалента. В проявителе же № 2 время проявления существенно влияет на эту величину: при увеличении времени проявления

фотометрический эквивалент возрастает, причем в наибольшей степени у пленки НР-S, а в наименьшей — у Микрат-200. Этот последний результат согласуется с данными Шепарда и Балларда [8].

Если фотометрический эквивалент действительно линейно [6] связан с диаметром серебряных зерен, то полученные результаты можно объяснить следующим образом. Если проявление идет в энергичном проявителе, каковым является проявитель № 1, то даже при малом времени проявления (4 мин.) достигается почти максимальный коэффициент контрастности у всех пленок (у Микрат-200,  $\gamma = 2.0$  при  $\gamma_{\max} = 2.3$ ; у типа Супер ХХ  $\gamma = 1.7$  при  $\gamma_{\max} = 1.8$ ; у Панхром Х  $\gamma = 1.6$  при  $\gamma_{\max} = 1.9$ ; у НР-S  $\gamma = 0.7$  при  $\gamma_{\max} = 0.9$ ) и оказываются полностью проявленными почти все эмульсионные кристаллы, которые должны проявиться при данной экспозиции. Дальнейшее увеличение продолжительности проявления существенно не изменяет среднего диаметра зерен серебра и связанной с ним величины фотометрического эквивалента. Если же проявление идет в сравнительно медленно работающем проявителе № 2, то при малом времени проявления (4 мин.) коэффициент контрастности существенно ниже максимальной величины (у Микрат-200  $\gamma = 1.0$  при  $\gamma_{\max} = 2.2$ ; у пленки типа Супер ХХ  $\gamma = 0.8$  при  $\gamma_{\max} = 1.2$ ; у Панхром Х  $\gamma = 0.5$  при  $\gamma_{\max} = 1.5$ ; у НР-S  $\gamma = 0.3$  при  $\gamma_{\max} = 0.9$ ) и даже крупные кристаллы, экспонированные при данной экспозиции, не успевают целиком проявиться, дальнейшее же увеличение продолжительности проявления способствует более полному проявлению эмульсионных кристаллов. Это и влечет за собой увеличение размера серебряных зерен и величины фотометрического эквивалента. Изменение времени проявления в проявителе № 2 от 2 до 32 мин. вызывает увеличение фотометрического эквивалента трех пленок в 1.2—2.5 раза, а одной (Микрат-200) — в 1.2 раза.

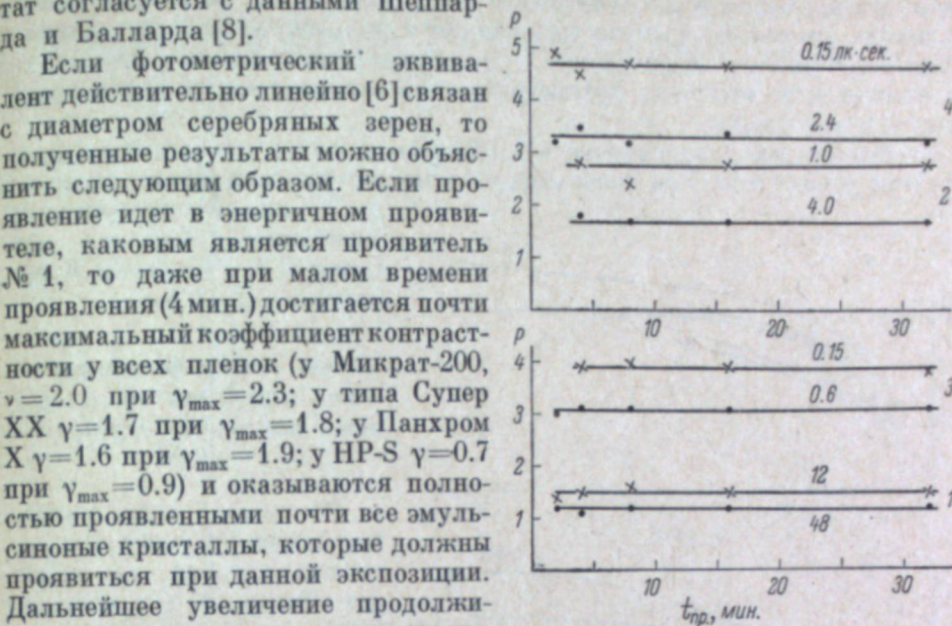


Рис. 8. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от времени проявления в проявителе № 1 для различно-экспонированных полей пленок: Микрат-200 (1), типа Супер ХХ (2), Панхром Х (3) и НР-S (4).

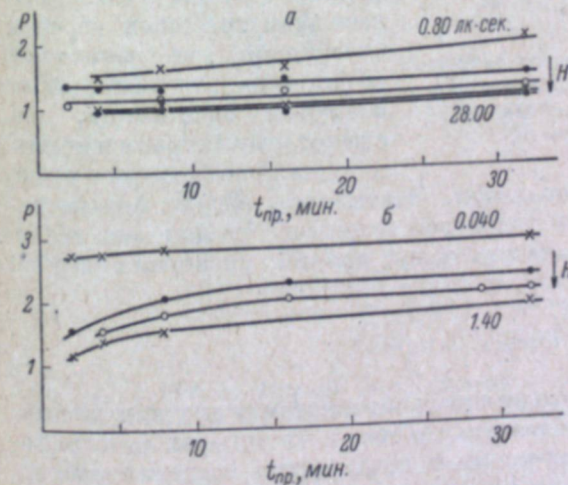


Рис. 9. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от времени проявления в проявителе № 2 для различно-экспонированных полей пленок Микрат-200 (а) и типа Супер ХХ (б).

Сравним величины фотометрического эквивалента мелкодисперсной пленки Микрат-200 и крупнодисперсной (которая дает в результате про-

явления наибольшие зерна серебра) HP-S, проявленных в проявителе № 2. Оказывается, что у Микрат-200 значения фотометрического эквивалента примерно в 2.5 раза ниже, чем у пленки HP-S. Следовательно, влияние изменения времени проявления в проявителе № 2 на величину фотометрического эквивалента крупнодисперсных пленок соизмеримо с влиянием на величину фотометрического эквивалента типа фотографического материала.

Аналогичные закономерности наблюдаются и при проявлении в физическом проявителе. При увеличении продолжительности проявления от 2 до 32 мин. фотометрический эквивалент пленок типа Супер XX и Панхром X возрастает в 2—3 раза.

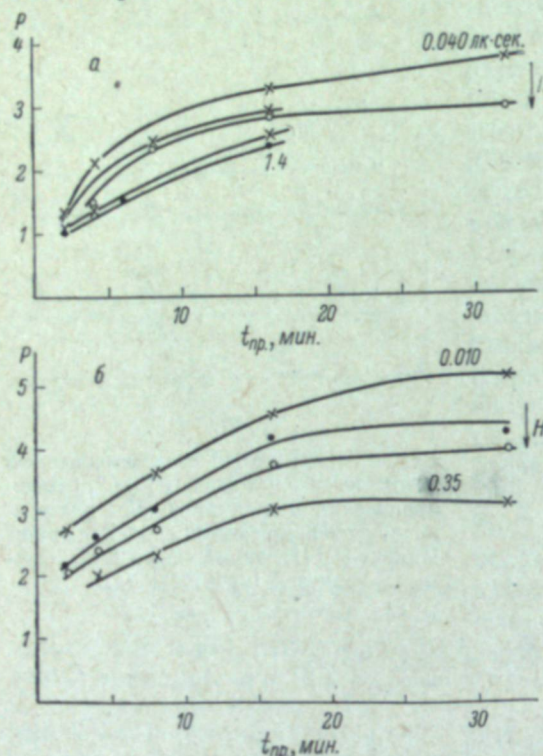


Рис. 10. Зависимость фотометрического эквивалента почернения от времени проявления в проявителе № 2 различно экспонированных полей пленок Панхром X (а) и HP-S (б).

Зависимость между фотометрическим эквивалентом и средним диаметром зерен серебра для всех исследованных ими материалов выражалась одной прямой, уравнение которой было при  $P$ , выраженном в  $\text{г/дм}^2$ , и  $d$  — в микронах.

$$P = 0.0184d + 0.0033.$$

Зависимость между фотометрическим эквивалентом и средним диаметром серебряных зерен мы устанавливали для тех же четырех фотографических материалов, которые изучались в предыдущих разделах работы. Средние размеры серебряных зерен определяли микрофотографическим методом.

В процессе проявления образуются серебряные зерна, форма и размеры которых существенно отличаются от таковых для эмульсионных кристаллов [9, 10]. Поэтому при определении размеров (площади проекции) зерен серебра нельзя пользоваться шкалами, рассчитанными на эмульсионные кристаллы определенной формы: круглые, треугольные,

шестиугольные. Нами была использована шкала, представлявшая собой миллиметровую сетку на прозрачной пластинке [11].

По полученным данным строили кривые распределения зерен металлического серебра по размерам  $\frac{dy}{dx} = f(x)$ , где  $x$  — площадь проекции зерна.

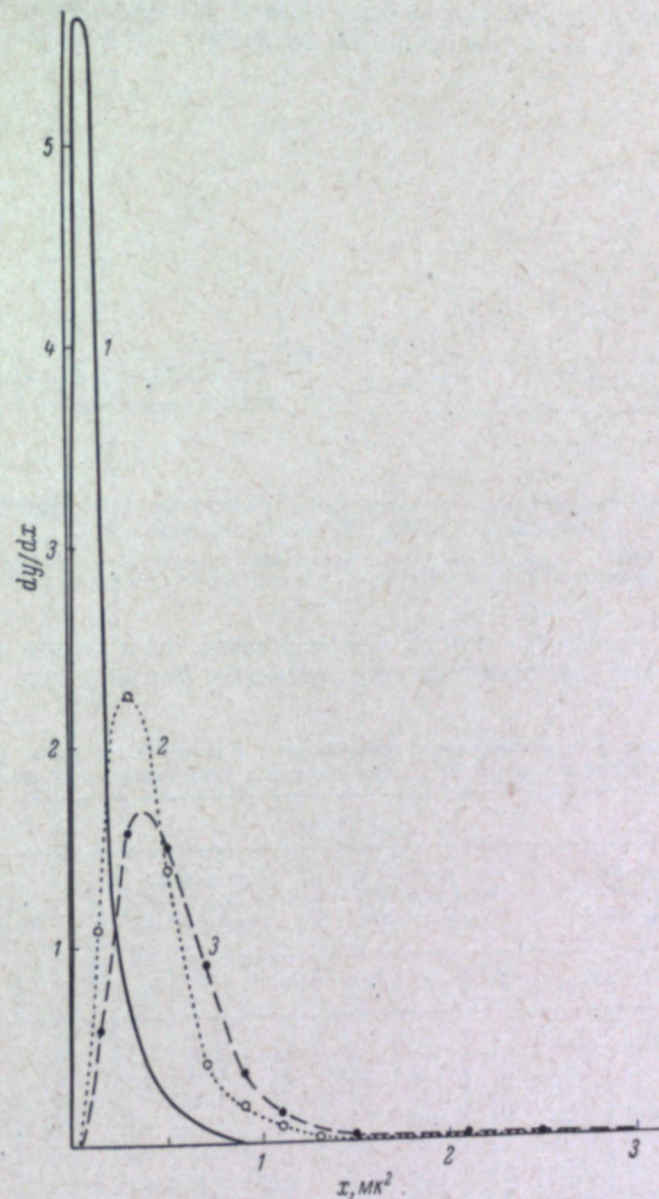


Рис. 11. Кривые распределения эмульсионных кристаллов и серебряных зерен по размерам для пленки Микрат-200. Проявитель № 1.

1 — кристаллы AgHal; 2 — серебряные зерна в почернении с  $x = 0.44 \text{ мк}^2$  и  $P = 1.2$ ; 3 — серебряные зерна в почернении с  $x = 0.55 \text{ мк}^2$  и  $P = 2.4$ .

Часть кривых (для двух материалов) представлена на рис. 11—14. На рисунках изображены кривые распределения по площадям проекции а) эмульсионных кристаллов и б) проявленных зерен серебра, относящиеся к почернениям с максимальным, минимальным и примерно средним

из выбранных нами значений фотометрического эквивалента. Средний эквивалентный диаметр\* зерен серебра менялся от 0.5 до 2.4 мк.

Кривые распределения эмульсионных кристаллов и полученных после проявления зерен серебра различаются по форме в наибольшей степени у пленки HP-S и в наименьшей — у Микрат-200. По мере увеличения фотометрического эквивалента кривые распределения серебряных зерен становятся все более пологими: возрастает число крупных зерен и

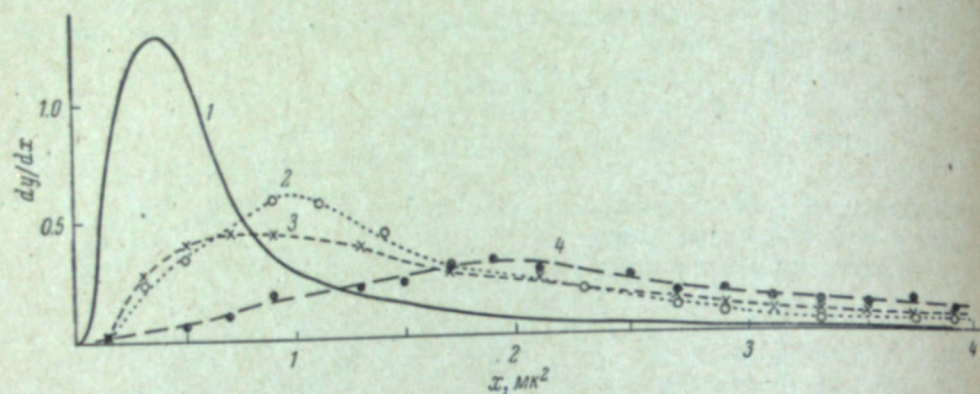


Рис. 12. Кривые распределения эмульсионных кристаллов и серебряных зерен по размерам для пленки HP-S. Проявитель № 1.

1 — кристаллы AgHal; 2 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=1.65$  мк<sup>2</sup> и  $P=2.3$ ; 3 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=2.55$  мк<sup>2</sup> и  $P=3.2$ ; 4 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=3.85$  мк<sup>2</sup> и  $P=4.3$ .

уменьшается количество мелких. Следовательно, почернения с большим фотометрическим эквивалентом действительно формируются из более

Таблица 3

Сопоставление фотометрического эквивалента  $P$  (г/м<sup>2</sup>) и средних размеров серебряных зерен  $\bar{x}$  (мк<sup>2</sup>) и  $\bar{d}_{\text{экр.}}$  (мк) для всех исследованных почернений

Проявитель по ГОСТу 2817-50	Пленки											
	Микрат-200, $\bar{x}_{\text{AgHal}} = 0.15$ , $\bar{d}_{\text{AgHal}} = 0.43$			типа Супер XX, $\bar{x}_{\text{AgHal}} = 0.46$ , $\bar{d}_{\text{AgHal}} = 0.77$			Панхром X, $\bar{x}_{\text{AgHal}} = 1.00$ , $\bar{d}_{\text{AgHal}} = 1.13$			HP-S, $\bar{x}_{\text{AgHal}} = 0.76$ , $\bar{d}_{\text{AgHal}} = 0.98$		
	$P$	$\bar{x}$	$\bar{d}_{\text{экр.}}$	$P$	$\bar{x}$	$\bar{d}_{\text{экр.}}$	$P$	$\bar{x}$	$\bar{d}_{\text{экр.}}$	$P$	$\bar{x}$	$\bar{d}_{\text{экр.}}$
№ 1	2.4	0.55	0.84	3.1	1.50	1.40	4.0	2.44	1.76	4.5	2.50	1.78
	2.0	0.56	0.84	2.8	1.21	1.24	3.1	1.93	1.56	4.3	3.86	2.22
	1.7	0.55	0.84	2.4	1.12	1.19	3.0	1.88	1.54	3.2	2.54	1.80
	1.5	0.44	0.75	1.9	0.92	1.08	2.7	1.73	1.50	2.3	1.67	1.46
	1.2	0.44	0.75	1.7	0.85	1.03	2.4	1.17	1.22	—	—	—
№ 2	2.0	0.47	0.77	3.2	1.20	1.24	5.0	3.42	2.08	5.2	4.36	2.36
	1.6	0.41	0.72	2.8	0.98	1.12	4.4	3.21	2.01	4.7	4.30	2.34
	1.5	0.36	0.68	2.3	1.06	1.16	3.6	2.16	1.66	4.3	3.48	2.11
	1.4	0.30	0.62	2.2	0.95	1.10	3.3	2.63	1.83	4.0	2.85	1.91
	1.3	0.30	0.62	2.1	0.92	1.08	3.0	2.23	1.68	3.7	3.33	2.06
	1.2	0.28	0.59	1.9	0.79	1.00	2.8	2.17	1.66	3.1	2.08	1.63
	1.1	0.29	0.60	1.6	0.50	0.80	2.4	1.44	1.35	2.8	1.67	1.46
	0.9	0.26	0.58	1.4	0.47	0.77	1.5	0.71	0.95	2.0	0.97	1.11
0.8	0.25	0.56	1.2	0.30	0.62	1.0	0.48	0.78	1.8	0.71	0.95	

\* Под эквивалентным диаметром зерна неправильной формы с площадью проекции  $x$  понимается величина  $\bar{d}_{\text{экр.}} = 2 \sqrt{\frac{x}{\pi}}$

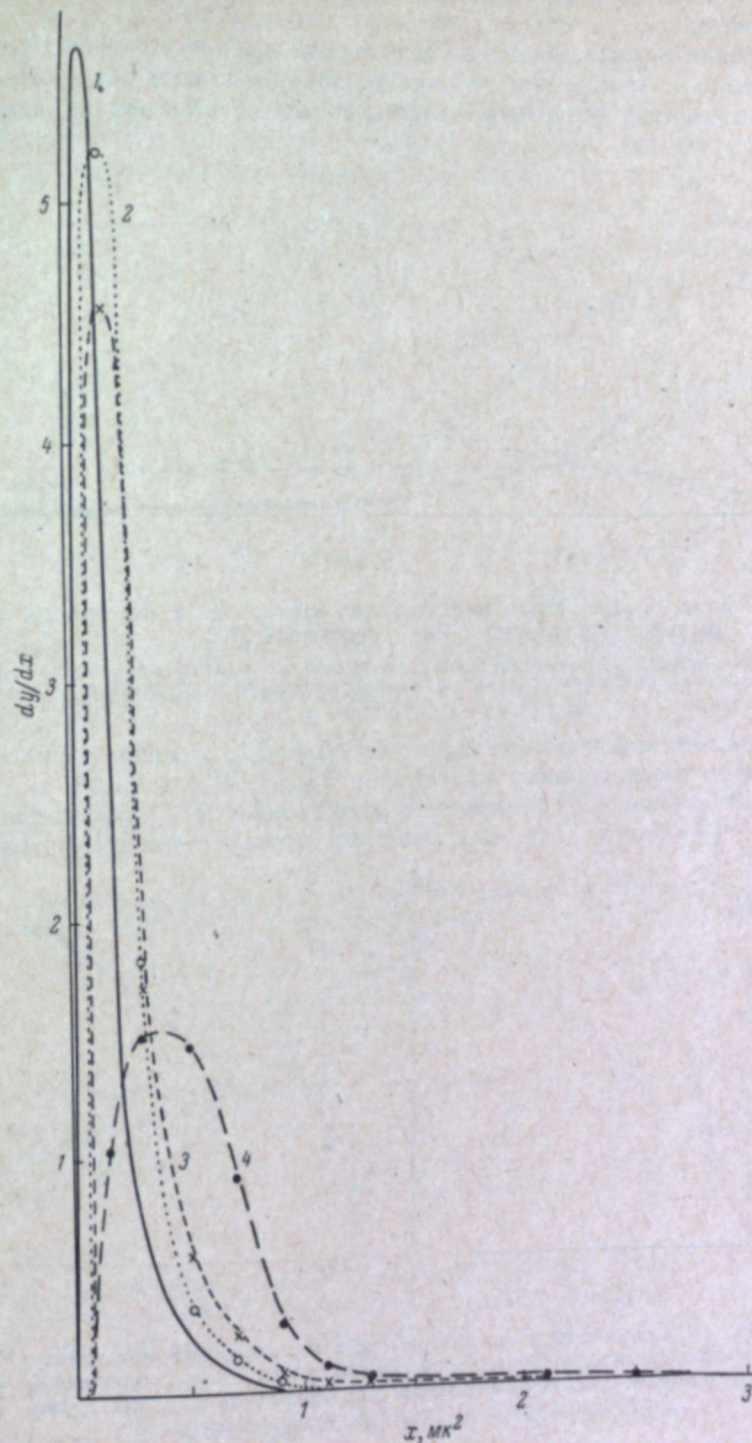


Рис. 13. Кривые распределения эмульсионных кристаллов и серебряных зерен по размерам для пленки Микрат-200. Проявитель № 2.

1 — кристаллы AgHal; 2 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=0.25$  мк<sup>2</sup> и  $P=0.8$ ; 3 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=0.30$  мк<sup>2</sup> и  $P=1.4$ ; 4 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=0.47$  мк<sup>2</sup> и  $P=2.0$ .

крупных зерен серебра, нежели почернения с малым фотометрическим эквивалентом.

Полученные нами числовые результаты сведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что у всех пленок, проявленных в проявителе № 1, и у пленки Микрат-200, проявленной в проявителе № 2, сред-

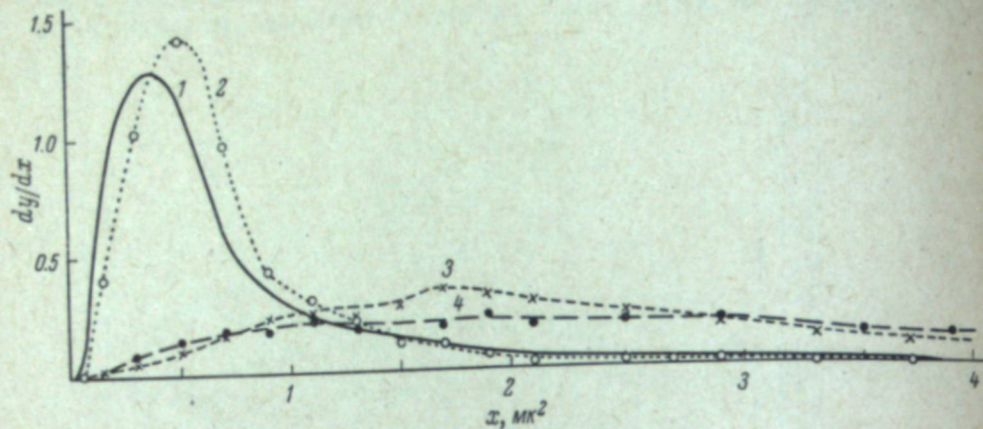


Рис. 14. Кривые распределения эмульсионных кристаллов и серебряных зерен по размерам для пленки HP-S. Проявитель № 2.

1 — кристаллы AgHal; 2 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=0.70$  мк<sup>2</sup> и  $P=1.8$ ; 3 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=3.30$  мк<sup>2</sup> и  $P=3.7$ ; 4 — серебряные зерна в почернении с  $\bar{x}=4.35$  мк<sup>2</sup> и  $P=5.2$ .

ний эквивалентный диаметр зерен серебра  $\bar{d}_{\text{экв}}$  больше, нежели средний диаметр эмульсионных кристаллов  $\bar{d}_{\text{AgHal}}$ . У остальных же пленок при малых временах проявления в проявителе № 2  $\bar{d}_{\text{экв}}$  меньше, чем  $\bar{d}_{\text{AgHal}}$ . Это объясняется тем, что за малые времена проявления

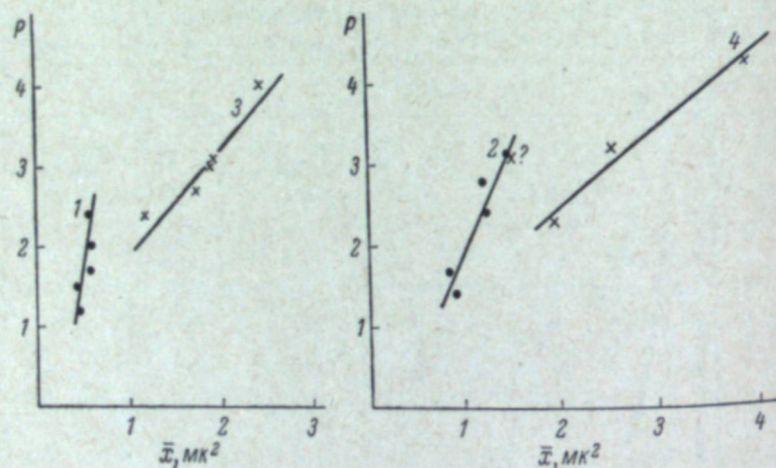


Рис. 15. Связь между фотометрическим эквивалентом почернения и средней площадью проекции серебряных зерен для различно экспонированных и проявленных материалов: Микрат-200 (1), типа Супер XX (2), Панхром X (3) и HP-S (4). Проявитель № 1.

(2—4 мин.) эмульсионные кристаллы не успевают полностью восстановиться, вследствие чего и уменьшается  $\bar{d}_{\text{экв}}$ .

Связь между фотометрическим эквивалентом и средней площадью проекции серебряных зерен для всех исследованных материалов представлена рис. 15 и 16. Мы видим, что фотометрический эквивалент в большинстве случаев с достаточной строгостью линейно связан со

средней площадью проекции зерен серебра. При этом угол наклона прямых  $P=f(x)$  к оси абсцисс у разных пленок различен: наибольший — у Микрат-200, наименьший — у HP-S. Наклон прямой для данного фотографического материала зависит в некоторой степени и от типа проявителя: он больше при проявлении в проявителе № 1. С меньшей точностью выполняется линейная зависимость  $P$  и от среднего эквивалентного диаметра зерен  $\bar{d}_{\text{экв}}$ .

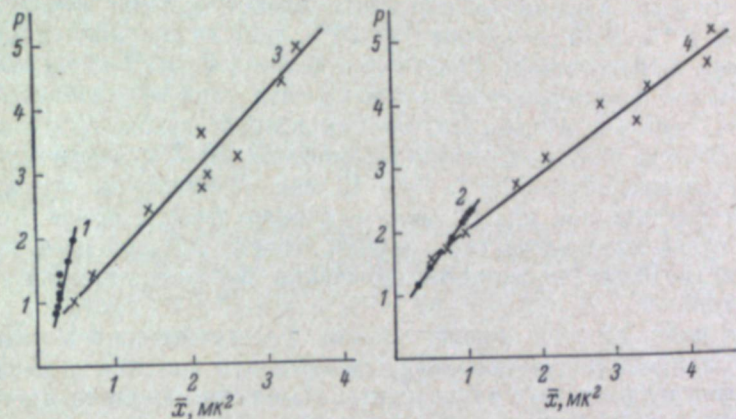


Рис. 16. Связь между фотометрическим эквивалентом почернения и средней площадью проекции серебряных зерен для различно экспонированных и проявленных материалов: Микрат-200 (1), типа Супер XX (2), Панхром X (3) и HP-S (4). Проявитель № 2.

В табл. 4 представлены полученные эмпирические уравнения прямых  $P=ax+b$ .

Таблица 4

Сводка линейных уравнений, связывающих фотометрический эквивалент со средней площадью проекции серебряных зерен почернения

Пленки	Проявитель по ГОСТу 2817-50	
	№ 1	№ 2
Микрат-200 . . . . .	$P = 6.50x - 1.60$	$P = 5.00x - 0.35$
Типа Супер XX . . . . .	$P = 2.60x - 0.65$	$P = 1.55x + 0.65$
Панхром X . . . . .	$P = 1.33x + 0.60$	$P = 1.25x + 0.45$
HP-S . . . . .	$P = 1.09x + 0.40$	$P = 0.90x + 1.20$

Таким образом, утверждение Эггерта и Кюстера [6], что зависимость  $P=f(\bar{d}_{\text{экв}})$  выражается, в определенных границах, единой прямой, общей для всех материалов, нашей работой, выполненной на современных материалах, не подтвердилось. На одну прямую ложатся точки, отвечающие лишь разным экспозициям и разным значениям коэффициента контрастности при проявлении данного материала в данном проявителе.

### Выводы

1. Для всех четырех исследованных материалов при различных, но постоянных в пределах одного опыта временах проявления от 2 до 32 мин. в проявителях №№ 1 и 2 по ГОСТу 2817-50, а для двух пленок и в физическом проявителе, значения фотометрического эквивалента уменьшаются

при возрастании оптической плотности почернения, обусловленном ростом действующей экспозиции. Данная зависимость наиболее ярко выражена у пленки, средний размер серебряных зерен которой наибольший (в нашем случае — у пленки HP-S).

2. При изменении плотности почернения (за счет изменения экспозиции) от 1.0 до 2.0 величина фотометрического эквивалента уменьшается для каждой данной пленки при проявлении в обоих проявителях в одинаковой степени: для мелкодисперсных пленок (размер эмульсионных кристаллов 0.15—0.45 мк<sup>2</sup>) — на 15—20%, для крупнодисперсных пленок (размер эмульсионных кристаллов 0.75—1.00 мк<sup>2</sup>) — на 25—30%.

3. Значения фотометрического эквивалента трех исследованных пленок при постоянной экспозиции, но при разной длительности проявления — от 2 до 8 мин. — в случае проявителя № 2 существенно ниже, чем в случае проявителя № 1. При 16 мин. проявления эти значения становятся близкими, а при 32 мин. — одинаковыми в обоих проявителях. Для особо мелкодисперсной пленки Микрат-200 при всех временах проявления в обоих проявителях значения фотометрического эквивалента близки.

4. Изменение степени проявленности фотографического материала в различных проявителях оказывает существенно различное влияние на величину фотометрического эквивалента. Изменение времени проявления в изучавшемся диапазоне времен в проявителе № 1 при данной экспозиции практически не сказывается на величине фотометрического эквивалента исследованных нами пленок. В то же время изменение продолжительности проявления в проявителе № 2 от 2 до 32 мин. вызывает увеличение фотометрического эквивалента крупнодисперсных пленок в 1.5—2.5 раза, а особо мелкодисперсной пленки Микрат-200 — в 1.2 раза. Наконец, при изменении времени проявления в том же интервале в физическом проявителе фотометрический эквивалент возрастает в 2—3 раза.

5. Связь между фотометрическим эквивалентом и средними размерами серебряных зерен, образующих почернение, в исследованном диапазоне размеров удовлетворительно описывается эмпирическими линейными уравнениями, отличающимися от уравнения, предложенного в свое время Эггертом и Кюстером. Линейно связаны фотометрический эквивалент и средняя площадь проекции зерна, причем для разных материалов, проявленных в каждом данном проявителе, коэффициенты линейного уравнения различны (а не едины, как считали Эггерт и Кюстер).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. Hurter, V. C. Driffield, J. Soc. Chem. Ind., 9, 455, 1890.
2. F. Feigl, Z. anal. Chemie, 74, 380, 1928.
3. Н. Н. Шишкина, Журн. аналитич. химии, 15, 431, 1960.
4. В. А. Коридорф, Усп. научн. фотогр., IV, 67—82, 1955.
5. Я. М. Веприк, Г. П. Фаерман, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 3, 345—350, 1958.
6. J. Eggert, A. Küster, Wiss. Veröff. Agfa, 5, 123—129, 1937.
7. О. В. Пясецкая, К. В. Вендровский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 5, 368—369, 1960.
8. S. E. Sheppard, A. Ballard, J. Frankl. Inst., 206, 659, 1928.
9. E. Klein, Z. Elektrochemie, 60, 998—1003, 1956; 62, 505—511, 1958.
10. A. Küster, Wiss. Veröff. Agfa, 7, 268—276, 1951.
11. Т. М. Левенберг, А. А. Маркелова, В. М. Кулешова, Тр. ЛИКИ, вып. 4, 179—188, 1956.

Т. М. ЛЕВЕНБЕРГ, Л. К. ЛОКУЦИЕВСКАЯ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОЗЕРНИСТОСТИ ОДНОКРАСОЧНЫХ ПОЗИТИВНЫХ ЦВЕТНЫХ ПОЛЕЙ ФОТОГРАФИЧЕСКИМ ПРОЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

#### Постановка задачи

Если исследованию макрозернистости черно-белых фотографических материалов и изображений посвящены многочисленные работы, то для цветофотографических материалов и изображений таких работ почти нет. Это в значительной мере объясняется отсутствием методики определения макрозернистости цветных полей.

Указанный вопрос приобрел сейчас особую остроту в связи с развитием в СССР гидротипного способа печати цветных фильмов. Макрозернистость многослойных пленок невелика: на цветных отпечатках она совсем незаметна, на кинопозитивах, где имеет место взаимное наложение макрозернистости негативного и позитивного материалов, она иногда обнаруживается, но качество изображения гораздо более страдает от недостаточной резкости, нежели от макрозернистости. В противоположность этому при гидротипной печати макрозернистость кинопозитивов настолько велика, что оказывается одним из наиболее неприятных дефектов изображения.

Из известных методов [1—7] определения макрозернистости лишь метод Крабтри и Швингела [3] и метод Джонса и Хиггинса [4] пригодны для этой цели, но они требуют весьма громоздкой аппаратуры. Поэтому представляло интерес разработать такой вариант фотографического проекционного метода [7, 8], который позволил бы решить поставленную задачу, используя отечественный гранулометр УКП-5 [9].

На первый взгляд, наиболее простым путем, позволяющим использовать фотографический проекционный метод для оценки зернистости цветных позитивных изображений, является применение в качестве детектора зернистости цветной обрабатываемой пленки. Однако процесс обращения требует длительной химико-фотографической обработки, что заставляет отказаться от этой возможности.

Для решения многих технологических и научных задач возникающих при изучении как гидротипного, так и многослойного процессов, достаточно иметь возможность оценить зернистость однокрасочных изображений — желтого, пурпурного и голубого, не наложенных друг на друга.

Для этой цели может быть использован черно-белый пахроматический материал с соответствующим образом подобранным компенсационным светофильтром, приводящим спектральную чувствительность пленки к спектральной чувствительности глаза. Такая комбинация должна пра-



вильно воспроизводить в черно-белом изображении яркостный контраст цветного однокрасочного изображения, в частности яркостный контраст его зернистой структуры.

Зернистость многоцветных позитивных изображений, например цветного изображения на бланкфильме, полученного переносом со всех трех матриц, подобным образом оценена быть не может, так как здесь играет роль не только яркостный, но и цветовой контраст, который в черно-белом изображении передать нельзя.

Авторами был разработан описанный далее вариант фотографического проекционного метода.

#### Подбор фотографических материалов и компенсационных светофильтров для печати гранулограмм

В фотографическом проекционном методе в качестве детектора зернистости может быть применена не только фотографическая бумага, но и материалы на прозрачной подложке.

Использование пленок или пластинок вносит усложнение в методику получения гранулограмм, из-за чего мы первоначально от них и отказались, но вместе с тем оно может иметь некоторые преимущества в смысле стандартизации метода. Средний градиент нормальных и мягких бумаг практически трудно определить с точностью, превышающей 6—10% [10], тогда как коэффициент контрастности пленок определяется с точностью до 3% [11]. Поэтому применение пленок позволяет значительно лучше стандартизовать степень контрастности детектора.

Далее, можно ожидать, что при проявлении разных пленок, служащих детектором зернистости, до одинакового коэффициента контрастности значения фактора зернистости с точностью до ошибок оценки будут получаться одинаковыми, так как в отличие от бумаг, благодаря большой широте пленок и возможности получить изображение на прямолинейном участке, различия в форме начального и конечного участков их характеристических кривых не должны здесь сказываться. Специально поставленные опыты подтвердили это предположение.

Ввиду указанных преимуществ, а также потому, что панхроматическая бумага практически редко встречается, мы при разработке метода определения зернистости цветных полей решили воспользоваться панхроматической пленкой.

Существенным моментом является выбор этой пленки-детектора. Она должна обладать достаточной шириной и иметь неокрашенную подложку. Ее светочувствительность должна быть не очень высока, в противном случае выдержки при печати гранулограмм будут слишком короткими и их трудно будет воспроизводить с достаточной точностью. Сам материал и условия его обработки должны быть подобраны так, чтобы время проявления до  $\gamma=0.9 \div 1.2^*$  лежало в пределах от 2 до 5 мин., так как слишком короткие времена проявления не позволят с достаточной точностью получать выбранное значение коэффициента контрастности, а слишком длинные неудобны в работе.

Указанным требованиям удовлетворяют отечественные фототехнические пленки ФТ-11\*\* и ФТ-12 и пленка Фототехническая С фирмы Агфа.

\* Использовать более низкие и более высокие значения  $\gamma$  неудобно, так как может оказаться, что в первом случае мелкозернистым, а во втором случае — крупнозернистым почернениям будут соответствовать предельные масштабы увеличения, лежащие за пределами того интервала увеличений (от 2.5 до 29\*), который дает гранулометр УКП-5.

\*\* Пленка ФТ-11 имеет окрашенный контрслой, но он очень легко снимается при обработке.

но первая из них, будучи пригодной для печати гранулограмм черно-белых почернений, не может быть использована для решения нашей задачи, так как имеет ортохроматическую сенсibiliзацию. У двух последних пленок при применении проявителя № 1 по ГОСТу значение  $\gamma=1$  достигается соответственно за 2 мин. и 1 м. 30 с. При этом фотографическая широта в обоих случаях составляет  $\sim 1.6$ . Таким образом, эти пленки по всем своим параметрам вполне подходят для печати гранулограмм; некоторое неудобство представляет лишь их высокая светочувствительность  $\sim 45-60$  ед. ГОСТа.

Расчет спектральных кривых поглощения компенсационных светофильтров производился по формуле

$$D_{\lambda} = \lg \frac{V_{\lambda}}{S_{\lambda}} + k,$$

где  $D_{\lambda}$  — монохроматическая оптическая плотность светофильтра;  $V_{\lambda}$  — относительная видимость;  $S_{\lambda}$  — спектральная чувствительность применяемой пленки;  $k$  — произвольное слагаемое.

При расчете были приняты значения относительной видимости, стандартизованные ГОСТом 8485. Спектральная чувствительность обеих пленок была определена на спектросенситометре ФСР-7 [12]. Значения  $\lg S_{\lambda}$  приведены в табл. 1, а на рис. 1 представлены построенные по этим значениям кривые спектральной чувствительности.

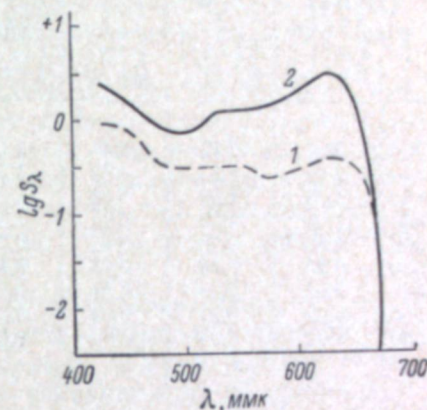


Рис. 1. Кривые спектральной чувствительности пленок, пригодных для печати гранулограмм.

1 — пленка Фототехническая С фирмы Агфа; 2 — пленка ФТ-12.

Таблица 1

Спектральная чувствительность пленок, которые могут использоваться для печати гранулограмм

$\lambda$ , ммк	$\lg S_{\lambda}$		$\lambda$ , ммк	$\lg S_{\lambda}$	
	пленка Фототехническая С	пленка ФТ-12		пленка Фототехническая С	пленка ФТ-12
420	-0.010	0.40	560	-0.53	0.12
440	-0.15	0.27	580	-0.60	0.20
460	-0.23	0.09	600	-0.51	0.32
480	-0.38	-0.09	620	-0.47	0.50
500	-0.50	-0.12	640	-0.44	0.42
520	-0.50	0.00	650	-0.46	0.27
540	-0.50	0.08	660	-1.00	-0.20
550	-0.50	—	680	-2.50	-2.50

В табл. 2 даны монохроматические плотности идеальных, требуемых расчетом компенсационных светофильтров к обеим пленкам и плотности двух реальных, изготовленных нами светофильтров. Светофильтр к пленке Фототехническая С состоит из стекол ЖЗС18 толщиной 3 мм, ЗС8 толщиной 2 мм и СС5 толщиной 2 мм; в светофильтр к пленке ФТ-12 входят стекло ЖЗС18 и ЗС8 той же толщины, а стекло СС5 заменено стеклом ЗС7 толщиной 1.6 мм. На рис. 2 и 3 даны данные в графической форме. Для удобства сравнения из всех значений монохроматической

Поглощение идеальных (требуемых расчетом) и реальных (фактически изготовленных) компенсационных светофильтров к пленкам Фототехническая С и ФТ-12

$\lambda$ , мкм	$D_{\lambda}$				$\lambda$ , мкм	$D_{\lambda}$			
	идеальный светофильтр к пленке Фототехническая С	реальный светофильтр из стекла ЖЗС18, ЗС8 и СС5	идеальный светофильтр к пленке ФТ-12	реальный светофильтр из стекла ЖЗС18, ЗС8 и СС5		идеальный светофильтр к пленке Фототехническая С	реальный светофильтр из стекла ЖЗС18, ЗС8 и СС5	идеальный светофильтр к пленке ФТ-12	реальный светофильтр из стекла ЖЗС18, ЗС8 и СС5
420	2.52	2.20	2.60	2.14	570	0.00	—	—	—
440	2.24	1.93	1.96	1.86	580	0.04	0.34	0.16	0.50
460	1.67	1.67	1.42	1.60	600	0.26	0.47	0.50	0.80
480	1.00	1.29	0.85	1.22	620	0.53	0.70	0.80	1.12
500	0.56	0.80	0.44	0.76	640	0.88	0.99	1.10	1.38
520	0.22	0.46	0.16	0.44	650	1.10	1.14	1.20	1.72
540	0.09	0.28	0.04	0.32	660	0.84	1.35	0.90	2.04
550	0.04	0.24	0.00	0.30	680	0.03	1.63	0.35	—
560	0.02	0.24	0.06	0.33					

ческих плотностей реальных светофильтров вычтены их плотности в минимуме поглощения, равные 0.24 (для пленки Фототехническая С) и 0.33 (для пленки ФТ-12).

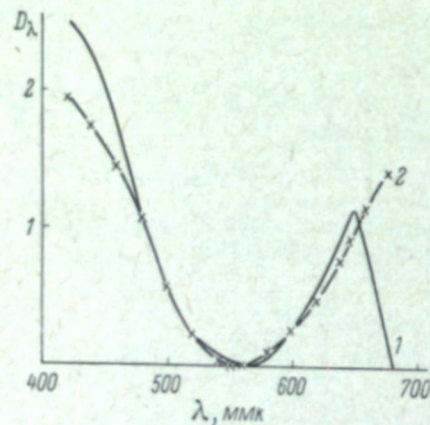


Рис. 2. Кривые поглощения идеального (1) и реального (2) компенсационных светофильтров к пленке Фототехническая С фирмы Агфа.

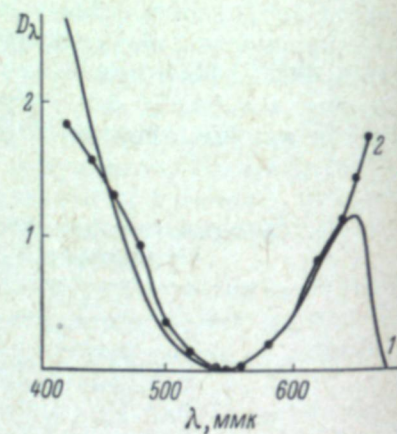


Рис. 3. Кривые поглощения идеального (1) и реального (2) компенсационных светофильтров к пленке ФТ-12.

### Сопоставление фактора зернистости однокрасочных полей с предельными расстояниями рассматривания

Необходимо было убедиться, что значения фактора зернистости однокрасочных полей, получаемые вышеописанным способом, достаточно хорошо соответствуют макрозернистости, наблюдаемой на практике.

С этой целью для ряда цветных полей был, с одной стороны, определен фактор зернистости  $G$  [7, 8], а с другой — предельное расстояние рассматривания  $L_{пр.}$  при проекции их на экран, как это делал и Крэбтри и Швингел [3], с той лишь разницей, что проекция была статической.

В качестве исследуемых цветных образцов использовались поля гидротипных матриц, любезно предоставленных нам Лабораторией обработки цветных фильмов.

Было отобрано девять пурпурных матриц, полученных при различных технологических режимах и имевших зернистую структуру, весьма различную по контрасту, форме и размерам элементов. Для полноты картины следовало бы определения  $G$ ,  $L_{пр.}$  произвести и для некоторого числа голубых матриц, но мы, к сожалению, не располагали соответствующими образцами с различной макрозернистостью и вынуждены были ограничиться единственной имевшейся в нашем распоряжении. Желтые матрицы исследовать не имеет смысла, так как визуальный контраст зернистой картины оказался настолько малым, что макрозернистость не поддавалась оценке.

Предварительный просмотр на экране показал, что подобно тому, как это имеет место у черно-белых фотографических материалов [1], при сохранении постоянной освещенности на образце макрозернистость матриц с изменением их плотности, т. е. с изменением концентрации красителя, проходит через максимум. Для пурпурной матрицы этот максимум достигается при поверхностной концентрации  $c_{п.} = 0.25$ , а для голубой при поверхностной концентрации  $c_{г.} = 0.40$ .\*

Можно предположить, что значения фактора зернистости и предельного расстояния рассматривания, соответствующие той области концентрации, где  $L_{пр.}$  растет с концентрацией, должны изменяться параллельно; в частности, это относится к максимальным значениям  $L_{пр.}$

Для той области концентраций, где  $L_{пр.}$  падает с концентрацией, такое предположение, очевидно, не может быть справедливо, так как при больших  $c$  на значениях  $L_{пр.}$  сказывается падение контрастной чувствительности глаза из-за малой яркости рассматриваемой картины, что не имеет места для фактора зернистости  $G$ , при определении которого эта яркость всегда одинакова и не зависит от плотности почернения или концентрации красителя в цветном поле.

Практически для нас наиболее интересно максимальное значение  $L_{пр.}$ , так как именно им определяется качество изображения в смысле зернистости. Поэтому высказанное выше предположение относительно пропорционального изменения  $L_{пр.}$  и  $G$  интереснее всего проверить для концентрации красителя, соответствующей максимуму  $L_{пр.}$ . На каждой из исследуемых матриц  $L_{пр.}$  и  $G$  определяли для поля, на котором зернистость наиболее заметна на экране.

Гранулограммы печатали на гранулометре УКП-5 на пленке Фототехническая С и проявляли в проявителе № 1 по ГОСТу до  $\gamma = 1.00 \pm 0.05$ ; для контроля коэффициента контрастности совместно с гранулограммой всегда проявляли сенситограмму. Плотность полей гранулограмм поддерживалась равной  $1.00 \pm 0.05$ .

Гранулограммы оценивались на просмотрном столе при диффузном освещении. Яркость просмотрного окна составляла  $\sim 400$  асб, а размер окна соответствовал размеру гранулограммы. Оценка производилась четырьмя наблюдателями, каждым по несколько раз в различные дни. Общее число оценок на каждую гранулограмму составляло 45.

При определении предельных расстояний рассматривания использовался диапроектор ЛЭТИ-55 с объективом РО 108-1,  $f=9$  см,  $1 : z=1 : 2$ . Освещенность экрана равнялась  $\sim 120$  лк. Масштаб проекции составлял  $\sim 80 \times$ .

\* Значения поверхностных концентраций приведены в условных спектрофотометрических единицах [13] и были измерены на монохроматоре УМ-2 с микрофотометрической приставкой [12]. Так как в этом устройстве фотоэлемент удален на некоторое расстояние от измеряемого слоя, то в случае рассеивающих слоев, какими являются гидротипные матрицы, прибор измеряет некоторые эффективные значения оптических плотностей.

Таблица 3

Сопоставление значений предельного расстояния рассматривания  $L_{пр.}$  и фактора зернистости  $G$  для однокрасочных цветных полей

Номер образца	Цвет матрицы	$c$	$L_{пр.}$	$\frac{\Delta L_{пр.}}{L_{пр.}}, \%$	$G$	$\frac{\Delta G}{G}, \%$
1	Пурпурный	0.22	1.2	11.0	12	7.0
2		0.22	2.6	13.0	16	7.5
3		0.25	3.6	7.0	17	9.5
4		0.24	3.6	13.0	20	9.5
5		0.23	3.4	6.5	20	9.0
6		0.33	4.2	12.0	26	9.5
7		0.24	4.8	7.5	26	9.0
8		0.29	5.7	4.0	28	11.0
9		0.24	5.0	5.5	29	11.0
10	Голубой	0.25	6.2	5.0	41	9.0
11		0.45	3.5	7.0	17	8.0
Среднее значение ошибки . . . . .				8.0		9.0

Результаты приведены в табл. 3 и на рис. 4, где по одной оси отложены значения  $L_{пр.}$ , а по другой — значения  $G$ . Между той и другой величиной существует параллелизм и зависимость близка к линейной, заметные отклонения от прямолинейности наблюдаются лишь для области малых значений  $L_{пр.}$  и  $G$ . Разброс точек для отдельных образцов лежит в пределах ошибки определения  $L_{пр.}$  и  $G$ . Значения  $L_{пр.}$  и  $G$ , соответствующие голубой матрице, не выпадают из общей зависимости, что свидетельствует о правильном выборе компенсационного светофильтра и о применимости его для однокрасочных полей различного цвета.

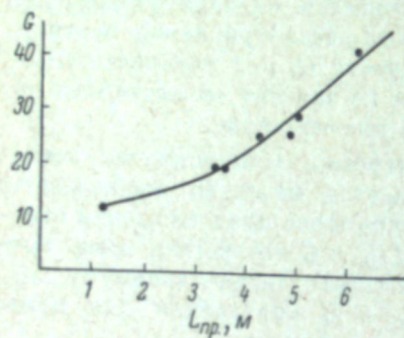


Рис. 4. Соотношение между фактором зернистости  $G$  и предельным расстоянием рассматривания  $L_{пр.}$  для однокрасочных цветных полей.

Таким образом, экспериментальные данные позволяют считать, что фактор зернистости, определенный по черно-белым гранулограммам, полученным на панхроматической пленке за компенсационным светофильтром, может быть принят в качестве количественной характеристики зернистости однокрасочных позитивных изображений. Это заключение можно считать справедливым не только для окрашенных матриц, но и для однокрасочных изображений на бланкфильме и однослойных поливов многослойной позитивной пленки, так как кривые поглощения красителей во всех этих случаях достаточно близки.

### Выводы

Разработанный вариант фотографического проекционного метода позволяет определять макрозернистость однокрасочных позитивных цветных полей и основан на использовании компенсационного светофильтра, приводящего кривую спектральной светочувствительности панхроматического фотографического материала к кривой видности человеческого глаза. Показано, что значения фактора зернистости, определенные этим

способом, находятся в хорошем соответствии с макрозернистостью цветных полей, наблюдаемой на практике.

Авторы выражают благодарность Б. Б. Штыкан за участие в расчете компенсационных светофильтров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. L. A. Jones, N. Deisch, J. Frankl. Inst., 190, 627, 1920.
2. E. M. Lowry, JOSA, 26, 65, 1936.
3. J. I. Crabtree, C. H. Swingel, JSMPTE, 19, 891, 1932.
4. L. A. Jones, G. C. Higgins, JOSA, 41, 41, 64, 1951.
5. В. Ромер, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 91, 1962.
6. А. Залеский, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 274, 1961.
7. Ю. Н. Гороховский. Методы фотографической сенситометрии. Госкиноиздат, М., 80, 88, 1948.
8. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. fotogr., I, 86, 1951.
9. Ю. Н. Гороховский, Б. М. Левин, Усп. научн. fotogr., IV, 117, 1955.
10. ГОСТ 5779—57. Бумага фотографическая общего назначения (позитивная) для черно-белой фотографии.
11. ГОСТ 2817—50. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод общесенситометрического испытания.
12. Ю. Н. Гороховский. Спектральные исследования фотографического процесса. Физматгиз, М., 1960.
13. Ю. Н. Гороховский, Д. К. Балабуха, Т. М. Левенберг, Усп. научн. fotogr., II, 85, 1954.

# VI. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ХИМИКО-ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

С. Г. БОГДАНОВ, А. Л. ШАМШЕВА

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОЯВЛЕНИИ В ПРОЯВИТЕЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Распределение интенсивности освещения в оптическом изображении фотографируемого объекта на светочувствительном слое в результате проявления реализуется в виде распределения плотностей почернений в фотографическом изображении. Если оптическое изображение объекта на светочувствительном слое весьма мало, то ореол рассеяния может стать соизмеримым с размерами оптического изображения, вследствие чего после проявления получается в той или иной степени размытое изображение объекта, и воспроизведение фотографическим слоем мелких деталей ухудшается.

Для выяснения роли проявителей различных типов в формировании фотографического изображения имеет смысл рассмотреть два следующих вопроса: 1) в какой степени размытость изображения зависит от выбора проявителя; 2) при каких условиях проявления можно получить изображение, которое, с учетом масштаба съемки, будет наиболее точно воспроизводить размеры объекта фотографирования.

Рассматривая первый из этих вопросов, можно исходить из предположения, что при проявлении одного и того же слоя в различного типа проявителях до достижения равных значений светочувствительности мы должны получить одинакового размера ореолы рассеяния в изображении фотографируемого объекта.

Для пояснения рассмотрим такой опыт.

На светочувствительном слое экспонируется равномерно освещенная щель. После проявления на негативе получается штрих, плотность почернения в котором убывает от середины к краям, где она уже почти неотличима от плотности вуали. При рассматривании под микроскопом ширина штриха определяется положением границ, где плотность превышает плотность вуали на некоторую критическую величину, определяющуюся свойствами глаза в данных условиях рассматривания. Если на том же светочувствительном слое и при той же продолжительности проявления получить сенситограмму, построить характеристическую кривую и найти на ней плотность, равную плотности на границе штриха, то можно принять, что освещенность в слое на этом участке в изображении фотографируемой щели равна освещенности на характеристической кривой в точке, отвечающей критическому значению плотности на штрихе.

Допустим, что эта критическая плотность на границе штриха на 0.2 превышает плотность вуали. В этом случае можно ожидать, что при проявлении одного и того же материала в проявителях различного типа до равных величин светочувствительности, определяемой по указанной плотности, мы получим изображения штриха одинаковой ширины. В действительности граница штрихов при рассматривании их под микроскопом бу-

дет находиться не при строго определенном уровне плотности почернения выше вуали, а, в зависимости от целого ряда физических и физиологических факторов, на различных уровнях. Поэтому лишь в первом приближении можно ожидать, что при проявлении в различных проявителях до равных величин светочувствительности  $S_{0.2}$  мы получим штрихи строго одинакового размера.

Все эти соображения лежали в основе проведения описанных ниже опытов.

На резольвометре СР-17 с объективом 8×, обладающим апертурой 0.2 и дающим уменьшение в 34 раза, экспонировалась мира со светлыми штрихами на темном фоне. Обычно экспонировалась светлый промежуток с шириной 1900 мк и в некоторых случаях с шириной 1560 мк. Ширина штрихов на негативе измерялась под микроскопом с помощью окуляр-микрометра при увеличении 50×. Этот способ измерения штрихов, которым пользовались еще первые исследователи [1] ореола рассеяния в фотографических слоях, не свободен от субъективных ошибок при установлении границы штриха, в особенности на грубодисперсных светочувствительных слоях. Однако если ограничиться сравнительно небольшими плотностями, то можно довольно уверенно производить измерения ширины штрихов даже и на этих слоях.

Экспозиция изменялась с помощью восьми серых фильтров различной плотности: 0.36, 0.74, 1.04, 1.38, 1.72, 2.09, 2.44 и 2.79.

Высказанное выше предположение, что размеры ореола рассеяния в изображении щели на негативе должны зависеть от величины светочувствительности, до которой проявлен светочувствительный слой, интересно было проверить прежде всего на примере проявителя с различной концентрацией бромистого калия. Как известно, при увеличении его концентрации понижается плотность вуали и замедляется скорость роста плотности изображения преимущественно на слабо освещенных участках. Поэтому в наших опытах можно ожидать существенного влияния концентрации бромидов на ширину штриха, поскольку последняя устанавливается под микроскопом на границе с вуалью. На рис. 1 приведены кривые изменения светочувствительности в проявителе № 1 по ГОСТу 2817-50 при содержании в нем разных количеств бромистого калия.

Как видно из рисунка, с уменьшением концентрации бромидов сокращается продолжительность проявления, необходимая для получения заданного значения светочувствительности. Так, например, равные значения светочувствительности получаются при проявлении в течение 8 мин. в проявителе, содержащем 8 г/л бромистого калия, и в течение 4 мин. в проявителе, содержащем 2 г/л.

На той же пленке экспонированием за фильтрами в резольвометре были получены изображения светлого штриха миры. Как в данном случае, так и в дальнейших опытах применялась мира абсолютного контраста.

Как видно из табл. 1, ширина штриха на негативах, проявленных в проявителях с разным содержанием бромистого калия, оказывается одинаковой

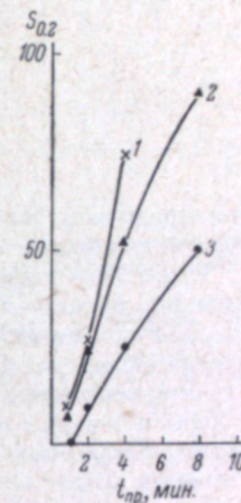


Рис. 1. Зависимость светочувствительности пленки Панхром XI от продолжительности проявления в проявителе № 1 при разных концентрациях бромистого калия.

1 — 1 г/л; 2 — 2 г/л; 3 — 8 г/л.

Таблица 1

Ширина штрихов в изображении их на пленке Панхром XI при проявлении в течение разных времен в проявителе № 1 по ГОСТу 2817-50 с разной концентрацией бромистого калия

Количество КBr, г/л	Время проявления t <sub>пр.</sub> , мин.	S <sub>с.л.</sub>	Ширина штрихов (мк) при различных значениях lg H <sub>отн.</sub>						
			4.00	3.64	3.26	2.98	2.62	2.28	1.91
8	8	50	—	—	106	90	70	59	53
	4	25	—	98	85	74	60	53	—
	2	10	96	86	67	58	50	—	—
2	4	52	—	—	104	87	70	58	53
	2	25	—	98	85	69	60	50	—
1	1	10	96	83	67	59	53	—	—

при продолжительностях проявления, дающих близкие значения светочувствительности.

Ранее было показано [2], что при проявлении в одном случае в забуференном проявителе, а в другом случае в проявителе с небольшой окислительно-восстановительной буферной емкостью можно подобрать такие продолжительности проявления, когда при совпадении нижних участков характеристических кривых наблюдается резкое снижение плотностей в области больших экспозиций при проявлении в малоабуференном проявителе. Последнее объясняется быстрым истощением этого проявителя в слое на сильно освещенных участках. В связи с этим возникает вопрос о том, какое влияние может иметь столь сильно выраженное истощение проявителя на выявление ореола рассеяния в изображении мелких деталей. Представляло интерес выяснить, как зависит ширина штрихов на негативах от экспозиции в том случае, когда они проявляются до равных значений светочувствительности соответственно в проявителе, имеющем большую буферную емкость, и в проявителе малоабуференном.

Пленка Панхром XVII экспонировалась в резольвомetre и проявлялась в проявителе D-19 и для сравнения в разработанном нами ранее проявителе ПВ-4 [2]. Состав проявителей дан в табл. 2.

Таблица 2  
Состав проявителей (содержание компонентов, г/л)

Компоненты проявителя	Проявители				
	D-19	ПВ-4	ПВ-6	№ 1 по ГОСТу	FX-1
Метол . . . . .	2.5	0.25	0.15	1.0	0.5
Сульфит безводный . . . . .	96	25	25	26	2.5
Гидрохинон . . . . .	8.8	0.25	0.15	5	—
Сода безводная . . . . .	48.0	—	—	20	2.5
Едкий натр . . . . .	—	—	—	—	—
Йодистый калий . . . . .	—	0.66	0.66	—	—
Бромистый калий . . . . .	—	—	—	—	5 · 10 <sup>-5</sup>
pH . . . . .	10.2	12	12	10.2	—

При продолжительностях проявления 12 и 16 мин. в проявителе ПВ-4 и 8 мин. в проявителе D-19 получают характеристические кривые

(рис. 2), на которых плотности в нижних участках практически мало отличаются. В то же время при проявлении в проявителе ПВ-4 плотности на сильно освещенных участках резко падают по сравнению с D-19. Вместе с сенситограммами мы получили изображение светлого штриха шириной 56 мк.

Мы видим, что фотографическое изображение штриха шириной, равной наложенному оптическому изображению штриха (56 мк), получается при экспозициях, отвечающих нижнему участку характеристических кривых. С возрастанием экспозиции ширина штриха увеличивается, что объясняется соответствующим увеличением ореола рассеяния. Однако характерно, что даже при больших, но равных значениях экспозиций ширина штриха практически оказывается одинаковой, несмотря на различный наклон характеристических кривых.

Результаты другого аналогичного опыта представлены на рис. 3. Пленка Панхром XI проявлялась в проявителе № 1 по ГОСТу и в проявителе FX-1 (табл. 2), представляющем в данном случае интерес

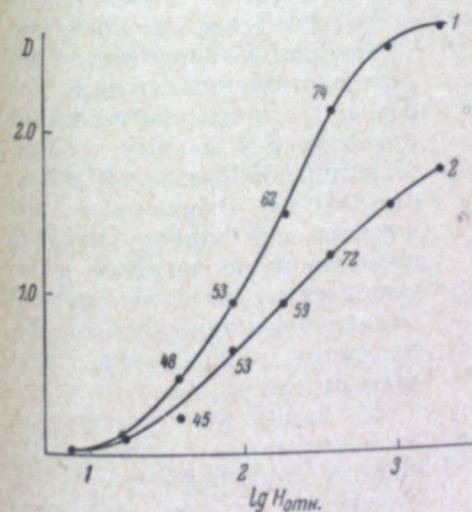


Рис. 3. Характеристические кривые пленки Панхром XI при разных условиях проявления.

1 — проявитель № 1, продолжительность проявления 8 мин.; 2 — проявитель FX-1, продолжительность проявления 20 мин. В кружках — ширина штриха, мк.

потому, что его можно приравнять к проявителю Кодак HD, который, как указывается в литературе [3], повышает резкость изображения. Вследствие небольшой концентрации метола проявитель FX-1 следует отнести к группе выравнивающих проявителей. Другой его особенностью является исключительно низкая концентрация сульфита и щелочи. Специфическое действие проявителя FX-1 Кроули [3] приписывают наличию в нем йодида, хотя и в исключительно низкой концентрации.

Из рис. 3 видно, что, несмотря на резкое различие сравниваемых проявителей по составу, как и в предыдущем случае, имеется определенная связь между размытостью штриха и степенью проявленности негатива в данном проявителе. А именно, если при проявлении в исследуемых проявителях достигаются равные величины светочувствительности, на что указывает совпадение нижних участков характеристических кривых, то в довольно широком интервале экспозиций изображения штриха оказы-

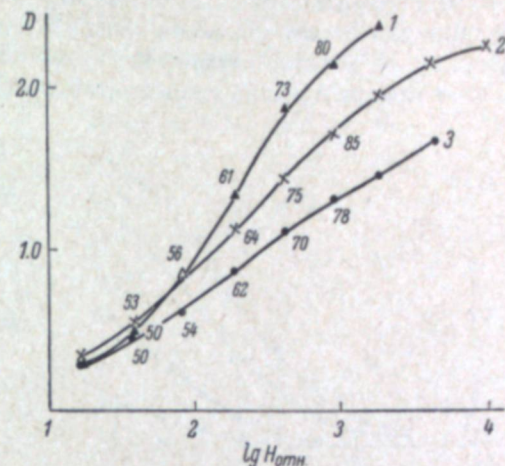


Рис. 2. Характеристические кривые пленки Панхром XVII при разных условиях проявления.

1 — проявитель D-19, продолжительность проявления 8 мин.; 2 — проявитель ПВ-4, продолжительность проявления 16 мин.; 3 — проявитель ПВ-4, продолжительность проявления 12 мин. В кружках — ширина штриха, мк.

ваются одинаковой ширины. Можно полагать, что это указывает на одинаковую степень проявления границы ореола рассеяния.

При уменьшении экспозиции штрих делается уже и менее размытым, и при некотором значении экспозиции на негативе получается штрих, равный по ширине оптическому изображению штриха. Интересно, что в этот момент граница штриха становится наиболее отчетливой. В особен-

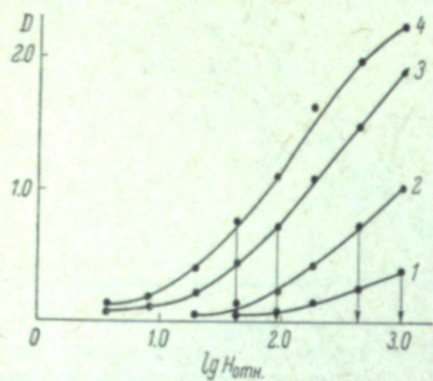


Рис. 4. Характеристические кривые пленки Панхром X при разных условиях проявления в проявителе D = 19. Продолжительность проявления: 1 — 1 мин.; 2 — 2 мин.; 3 — 4 мин.; 4 — 6 мин.

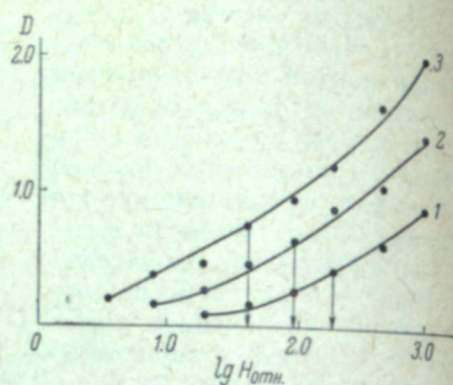


Рис. 5. Характеристические кривые пленки Илфорд HP-3 при разных условиях проявления в проявителе № 1. Продолжительность проявления: 1 — 1 мин.; 2 — 2 мин.; 3 — 6 мин.

ности это заметно на грубодисперсных материалах, на которых границу штриха установить не всегда легко.

Представляло интерес выяснить, какая связь существует между экспозицией, плотностью почернения и появлением на негативе штриха, точно воспроизводящего ширину наложенного на слой оптического изображения.

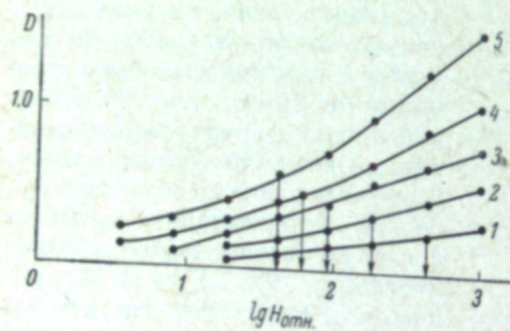


Рис. 6. Характеристические кривые пленки Илфорд HP-3 при разных условиях проявления в проявителе FX-1. Продолжительность проявления: 1 — 2 мин.; 2 — 4 мин.; 3 — 6 мин.; 4 — 12 мин.; 5 — 20 мин.

ности экспозиция. Вместе с этим плотности на сенситограмме, отвечающие этим экспозициям, увеличиваются с продолжительностью проявления, не превышая, однако, 0.9—0.8.

В связи с этим следует отметить указания некоторых авторов [4], что в случае использования аэропленок при экспозициях, которым отвечают плотности порядка 0.85—1.0, получают максимальные величины разрешаемой частоты одномерной решетки.

Если сравнить между собой (рис. 7) кривую зависимости разрешаемой частоты  $f_{max}$  от экспозиции и ход изменения с экспозицией ширины изображения изолированного штриха (цифры около кривых), то обнаруживается следующая закономерность: наиболее точно штрих шириной 56 мк воспроизводится в фотографическом изображении при экспозиции, для которой мы имеем максимальную разрешаемую частоту.

В том, что это не случайный факт, нас убедили опыты с другими светочувствительными материалами и проявителями: проявление пленки Панхром X в проявителе D-19 и ПВ-4 (рис. 8) и пленки Илфорд HP-3 в проявителе FX-1 (рис. 9).

На рис. 10 приводятся кривые зависимости разрешаемой частоты от экспозиции пленки Панхром X, кинонегативной пленки AM-35 и мелкодисперсной пленки Микрат, проявленных в течение 8 мин. в проявителе № 2 по ГОСТу. В этом случае экспонировался светлый штрих, обладающий в оптическом изображении шириной 46 мк.

Увеличение ширины изображения изолированного штриха и снижение разрешаемой частоты решетки с ростом экспозиции являются, очевидно, следствием того, что при этом увеличивается ореол рассеяния.

С другой стороны, при уменьшении экспозиции против оптимального ее значения разрешаемая частота решетки также падает, и этому в наших опытах сопутствует уменьшение ширины изображения изолирован-

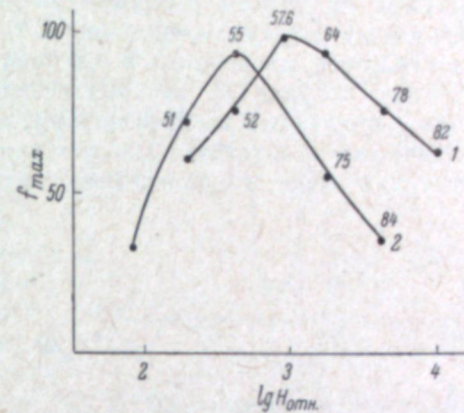


Рис. 7. Кривые разрешения пленки Илфорд HP-3 при проявителе ПВ-4.

Продолжительность проявления: 1 — 4 мин.; 2 — 8 мин. В кружках — ширина штриха, мк.

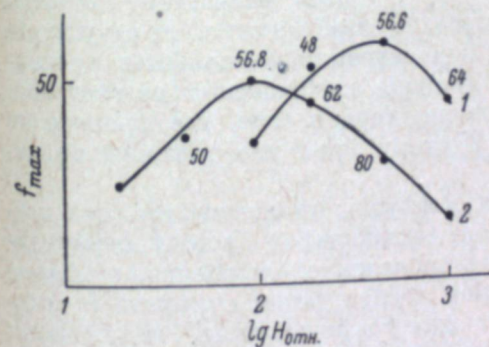


Рис. 8. Кривые разрешения пленки Панхром X при проявителе D-19. Продолжительность проявления: 1 — 2 мин.; 2 — 4 мин. В кружках — ширина штриха, мк.

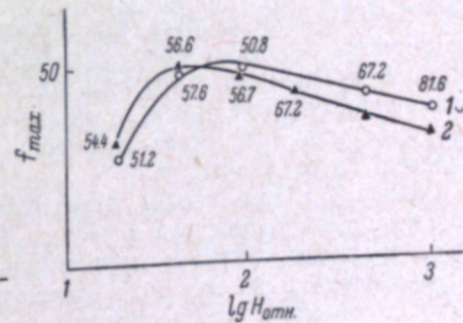


Рис. 9. Кривые разрешения пленки Илфорд HP-3 при проявителе FX-1. Продолжительность проявления: 1 — 6 мин.; 2 — 12 мин. В кружках — ширина штриха, мк.

ного штриха. Последнее сначала становится меньше наложенного оптического изображения штриха и затем исчезает. Казалось бы, при малых экспозициях уменьшение ширины штриха должно сопровождаться увеличением разрешаемой частоты решетки. Действительно, если ее снижение при экспозициях, превышающих оптимальную, обусловлено тем, что с увеличением ореола рассеяния промежутки между штрихами мира в изображении увеличиваются, почему и происходит падение контраста, то теперь, когда штрих на негативе уже, чем в оптическом изобра-

жении, это не должно иметь места. Между тем наблюдающееся падение контраста и соответственно величины разрешаемой частоты объясняется в данном случае другой причиной.

Интенсивность освещения в изображении штриха вследствие рассеяния света эмульсионным слоем убывает от середины к краю. Так, в зависимости от степени рассеяния света при определенной ширине экспонируемого штриха освещенность в точке, где находится изображение его границы, может стать в два раза меньшей, чем в точке, отвечающей середине штриха [1]. Поэтому когда при некоторой экспозиции на негативе получается изображение штриха, более узкое, чем экспонируемое оптическое изображение, то это указывает на то, что экспозиция уже настолько мала, что дальнейшее значительное уменьшение ее не позволит

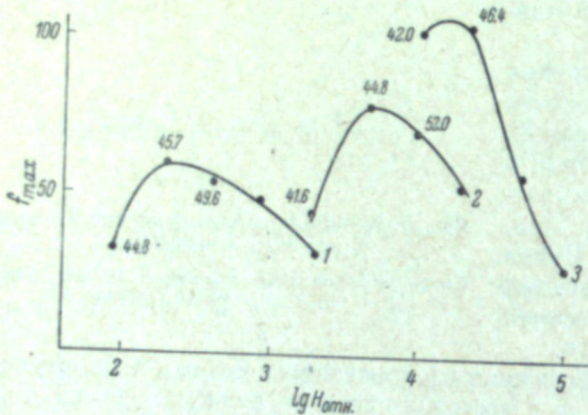


Рис. 10. Кривые разрешения пленок Панхром X (1), AM-35 (2) и Микрат (3) при проявителе № 2 по ГОСТу.

Продолжительность проявления 8 мин.

при данной продолжительности проявления получить плотность, достаточную, чтобы иметь необходимый контраст.

Для применения современных методов оценки ореола рассеяния в слое, а также для расчета коэффициентов передачи в системе объектив—слой—проявитель необходимо, чтобы в процессе формирования изображения мелких деталей краевые эффекты проявления были минимальными. Последние в той или иной степени должны неизбежно возникать вследствие истоще-

ния проявителя в слое, где локализовано изображение. В результате у границы его возникает градиент концентрации компонентов проявителя и происходит диффузия их к границе изображения из раствора, находящегося над слоем, а также из раствора в слое, где проявление не идет или идет очень медленно. Поэтому край изображения проявляется более энергично.

Наряду с этим в слое происходит диффузия продуктов реакции восстановления бромистого серебра. Накапливающийся бромид диффундирует в соседние места и тормозит здесь проявление. Окисленная же форма проявляющих веществ при достаточной концентрации сульфита с большой скоростью превращается в их сульфопроизводные, являющиеся также восстановителями, хотя и менее активными, чем исходные проявляющие вещества. Поэтому, диффундируя из мест, где восстановление бромистого серебра идет с большой скоростью, в места, где скорость реакции невелика, они не должны играть какую-либо роль в возникновении краевых эффектов проявления.

Реакция восстановления бромистого серебра проявляющими веществами сопровождается понижением pH. Вдали от границы изображения pH понижается более значительно, чем на краю, так как сюда диффундирует свежий проявитель, имеющий исходную величину pH. Следовательно, край изображения проявляется проявителем, имеющим более высокую концентрацию проявляющих веществ и более высокое pH.

Из всего сказанного следует, что во избежание появления краевых эффектов проявления надо пользоваться проявителями, обладающими

большой окислительно-восстановительной буферной емкостью и достаточной концентрацией бромистого калия.

В качестве иллюстрации этого положения на рис. 11 приведены записанные с помощью регистрирующего микрофотометра высокой чувствительности [5] плотности почернений в штрихе и на его границе. Эта установка позволяет производить измерения непосредственно в величинах оптической плотности на площади 170 мк<sup>2</sup>. до плотности 2.8. Штрихи были получены путем контактной печати миры абсолютного контраста в коллиматоре. Проявлялась пленка 2 мин. в проявителе № 1 и 16 мин. в проявителе ПВ-4. При этих продолжительностях проявления достигаются близкие величины плотности и ширины изображения штрихов.

Однако плотность в штрихе, полученном при проявлении в незабуферном проявителе ПВ-4, резко падает от краев к середине. Этого не наблюдается при проявлении в забуферном проявителе № 1. Зависимость краевых эффектов проявления от буферной емкости проявителя хорошо обнаруживается также в случае проявления изображения полуплоскости.

Далее показаны кривые распределения плотностей почернения на границе полуплоскости при проявлении в хорошо забуферном проявителе D-19 и в проявителе с незначительной буферной емкостью FX-1.

Изображение края полуплоскости получалось в специальной копировальной рамке [6]. Рамка освещалась параллельным пучком света с расходимостью пучка не более 11.5'.

На рис. 12 приведены пограничные кривые, полученные в результате проявления пленки Панхром XI в сравниваемых проявителях.

Мы видим, что здесь, так же как и при проявлении изображения изолированного штриха, краевой эффект проявления отчетливо выявляется при употреблении незабуферного проявителя FX-1, тогда как при проявлении в хорошо забуферном проявителе такой эффект не обнаруживается.

Интересные результаты были получены в опытах с теми же проявителями на мелкодисперсной пленке Микрат-200. В этом случае, как видно из рис. 13, при проявлении в проявителе FX-1, помимо резко выраженного краевого эффекта в области больших плотностей, отчетливо выявлен краевой эффект в области геометрической тени

изображения полуплоскости, где освещение создается вследствие рассеяния света эмульсионным слоем. В то же время указанный эффект совершенно отсутствует при проявлении в забуферном проявителе D-19. Если обратить внимание на то, что пограничная кривая почернений на этой пленке очень крута, что объясняется слабым рассеянием света эмульсионным слоем, то этот эффект станет понятным, если иметь в виду, что в прояви-

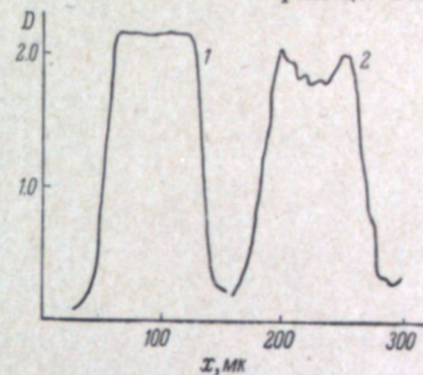


Рис. 11. Распределение плотности в изображении штриха на пленке Панхром X.

1 — проявитель № 1, продолжительность проявления 2 мин.; 2 — проявитель ПВ-4, продолжительность проявления 16 мин.

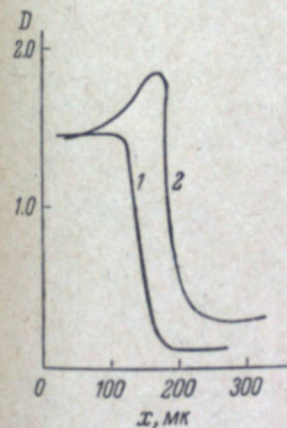


Рис. 12. Пограничные кривые для пленки Панхром XI.

1 — проявитель D-19; 2 — проявитель FX-1.

теле FX-1 нет бромида. Действительно, при проявлении сильно освещенного края полуплоскости в слое образуется значительная концентрация бромида. Чем круче идет кривая почернений у края полуплоскости, тем меньше диффузионный путь для бромида к месту слабоэкспонированному и тем, следовательно, выше его концентрация в этом месте и больше тормозящее действие при проявлении.

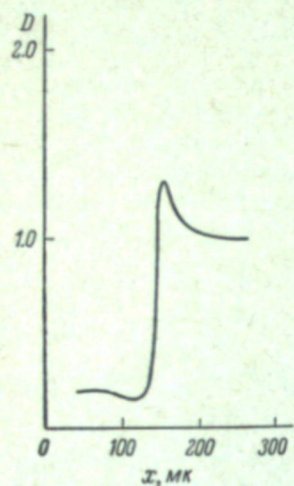


Рис. 13. Пограничная кривая для пленки Микрат-200 в проявителе FX-1.

В наших опытах, которые имели своей целью исследование зависимости ширины штриха от величины светочувствительности, мы с помощью резольвометра СР-17 при разных экспозициях получили на светочувствительных слоях изображение светлых штрихов ширины и, кроме того, сенситограмму. Последняя создавалась экспонированием круглого отверстия, изображение которого на слое в отсутствие ореола рассеяния равно примерно 2 мм. При указанном диаметре можно было не опасаться снижения эффективной освещенности в центре вследствие рассеяния света эмульсионным слоем. Измерив на микрофотометре максимальную плотность штриха и плотность в центре кружка на сенситограмме, можно получить представление о том, какую роль играет величина буферной емкости проявителя при формировании плотности почернения в изображении как мелких, так и крупных деталей.

На рис. 14 представлены характеристические кривые, построенные по плотностям в центре кружков и по плотностям в середине штрихов. Последние получались в результате экспонирования светлых штрихов ширины разной ширины на пленке Панхром XI. Проявление проводилось в проявителе D-19. Большая окислительно-восстановительная буферная емкость этого проявителя вместе с высокой концентрацией бромида при условии достаточно хорошего перемешивания раствора должна способ-

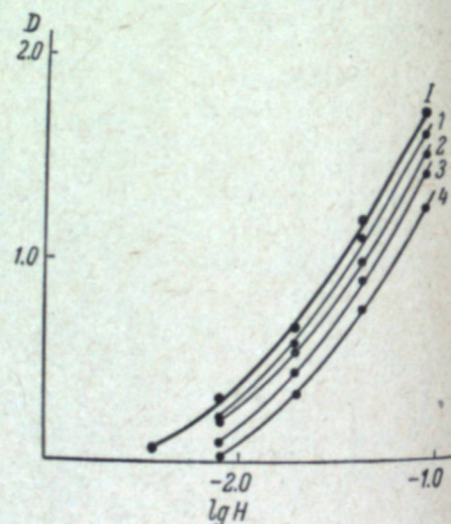


Рис. 14. Характеристические кривые пленки Панхром XI в случае кружка диаметром 2 мм (1) и штрихов шириной 56 (1), 28 (2), 19 (3) и 13 мк (4) при проявителе D-19 и продолжительности проявления 2 мин.

ствовать получению изображения мелких деталей с минимальными краевыми эффектами. Следует отметить, что во всех этих опытах раствор при проявлении перемешивался кистью с помощью механической мешалки.

Мы видим, что при всех экспозициях плотность штрихов меньше, чем плотность кружков, причем эта разница увеличивается с уменьшением ширины штриха.

Иная картина наблюдается тогда, когда та же пленка, экспонированная при тех же условиях, проявлялась в проявителе ПВ-6, отличающемся от проявителя ПВ-4 только меньшей на 40% концентрацией метола и гидрохинона. На рис. 15 приведены характеристические кривые, полученные при проявлении в этом проявителе в течение 16 и 24 мин. При продолжительности проявления 16 мин. для небольших экспозиций штрихи имеют меньшую плотность, чем кружки. Однако по мере увеличения экспозиции плотность штрихов возрастает и с некоторого момента становится больше плотности кружков. При более длительном проявлении это имеет место только для высоких экспозиций.

Выше было показано, что при проявлении как в хорошо забуференном проявителе, так и в проявителе с низкой буферной емкостью при условии проявления до равной величины светочувствительности получаются одинаковые по ширине штрихи. Это указывает на то, что в данном случае ореол рассеяния в изображении обнаруживается одинаково. В то же время, если сравнивать характеристические кривые, представленные на рис. 2 и 3, можно прийти к выводу, что плотность почернения в середине штриха, проявленного в хорошо забуференном проявителе, должна получаться более высокой, чем при проявлении в незабуференном проявителе. Следовательно, при проявлении в мало забуференном проявителе контраст штриха должен быть более низким. Поэтому, казалось бы, выравнивающие проявители, которые имеют незначительную буферную емкость, не должны быть пригодными для воспроизведения мелких деталей.

Однако, как следует из наших опытов (рис. 15), при проявлении в выравнивающем проявителе, подобном ПВ-6, плотность в изображении детали небольшого размера может даже превосходить плотность, которая с тем же проявителем и при тех же условиях экспонирования и прояв-

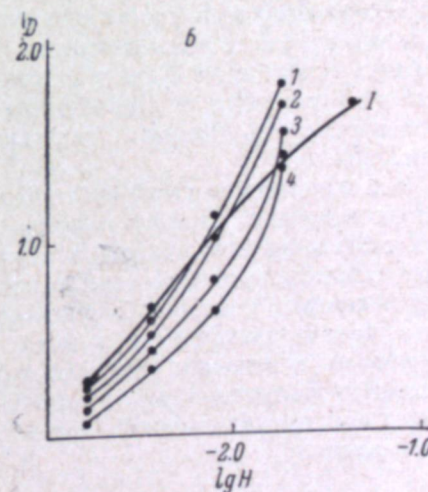
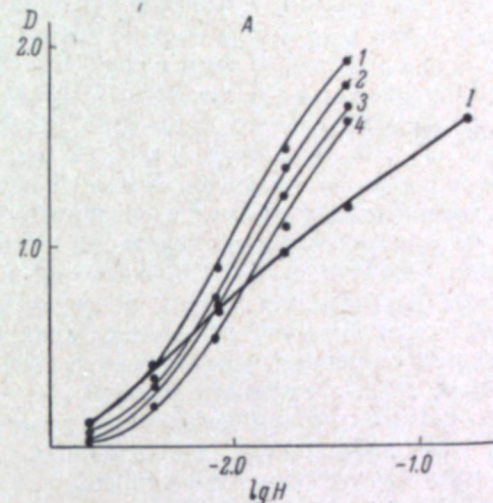


Рис. 15. Зависимость плотности пленки Панхром XI от экспозиции в изображении кружка диаметром 2 мм (1) и штрихов шириной 56 (1), 28 (2), 19 (3) и 13 мк (4) при проявителе ПВ-6.

Продолжительность проявления: А — 16 мин.; Б — 24 мин.



ления получается при проявлении изображения детали крупного размера. Это объясняется следующим обстоятельством. В изображении детали небольшого размера действующая освещенность в слое в центре вследствие рассеяния света меньше, чем в центре изображения деталей крупных, где этот эффект в точках, удаленных от края, практически не ощущается. Между тем локальное истощение проявителя более значительно при проявлении изображения крупных деталей. Это в особенности следует иметь в виду при использовании проявителя с незначительной буферной емкостью. В этом случае при проявлении небольшого элемента изображения расход проявителя может быть настолько небольшим, что заметного локального истощения проявителя практически может и не быть. Другое дело, когда в этом же проявителе проявляется изображение детали крупного размера. Большой расход проявителя влечет за собой снижение концентрации, подкисление проявителя и накопление бромида. В результате скорость проявления в этом месте сильно уменьшится. Чем выше экспозиция, тем сильнее будет выражено это различие в проявлении изображения мелких и крупных деталей. Начиная с некоторой достаточно большой экспозиции, локальное снижение активности проявителя становится уже настолько значительным, что плотность изображения детали крупного размера получается меньшей, чем плотность изображения детали небольшого размера. Это имеет место несмотря на то, что действующая интенсивность освещения при экспонировании в последнем случае более низка.

Если проявление осуществляется проявителем, имеющим большую буферную емкость и достаточно высокую концентрацию бромида, то при условии хорошего перемешивания раствора при проявлении указанного эффекта может и не быть и плотность изображения деталей крупных и мелких получается в соответствии с действующим в них количеством освещения. Это хорошо подтверждается в опытах с проявителем (рис. 14).

Все изложенное выше относительно формирования плотности в изображении деталей разного размера в проявителях с небольшой буферной емкостью позволяет сделать следующее замечание. Ввиду того что контраст в изображении деталей небольшого размера может оказаться при определенных условиях экспонирования выше ожидаемого исходя из вида характеристических кривых, получаемых при обычном сенситометрическом испытании выравнивающих проявителей, не исключена возможность получения при употреблении их такого же качества воспроизведения мелких деталей, как и при проявлении в высококонтрастных проявителях.

### Выводы

1. Независимо от рецепта проявителя размеры ореола рассеяния в слое получаются одинаковыми при условии проявления до равных значений светочувствительности, определяемой по нижнему участку характеристической кривой.

2. Наиболее точное воспроизведение размеров элементов оптического изображения объекта фотографирования и максимальная разрешаемая частота одномерной решетки достигаются при одних и тех же экспозициях.

3. Уровень краевых эффектов проявления в сильнейшей степени зависит от величины окислительно-восстановительной буферности проявителя и от содержания в нем бромида.

4. При проявлении в незабуференных проявителях при определенных условиях экспонирования и проявления плотность в изображении мел-

ких деталей может быть значительно большей, чем в изображении деталей большого размера. Это может иметь место даже в том случае, когда действующее количество освещения в слое в изображении деталей большого размера выше, чем в изображении мелких деталей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Frieser, Fortschritte der Photographie, 3, 73—112, 1944.
2. С. Г. Богданов, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 6, 117, 1961.
3. W. G. Crowley, Brit. Journ. Phot., 108, 38, 1961.
4. M. Levy, Phot. Sci. a. Eng., 5, 159, 1961.
5. Ю. К. Вифанский, Опт.-мех. промышл., 27, вып. 12, 29—32, 1960.
6. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 345, 1959.
7. G. Eberhard, Physik. Z., 13, 288, 1912.
8. Н. Н. Валенков, Z. Wiss. Phot., 27, 236, 1930.
9. И. И. Брейдо, Усп. научн. фотогр., 1, 118, 1951.
10. И. И. Брейдо, Изв. Главн. астр. обсерв., 22, вып. 4, 206—214, 1961.

В. А. ВЕЙДЕНБАХ, П. И. ЛЕВИНА

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ БЫСТРОМУ ПРОЯВЛЕНИЮ

Быстрые способы обработки фотографических материалов, и в частности быстрое проявление, находят в настоящее время все большее применение. Ускорение процесса обработки достигается путем применения специальных быстро обрабатываемых светочувствительных материалов и интенсификацией самих процессов обработки. Интенсификация проявления достигается применением высокоактивных проявляющих веществ в большой концентрации, увеличением рН проявителей, а также значительным повышением температуры обработки. Такое «ужесточение» режима проявления может оказать влияние на качество получаемого фотографического изображения. Поэтому для практики быстрого проявления существенное значение приобретает выяснение того, как сокращение времени получения фотографического изображения влияет на его качество.

В прежних работах [1—4], посвященных исследованию влияния концентрации проявляющих веществ на процесс быстрого проявления, был предложен рецепт метолгидрохинонового проявителя, содержащего метол и гидрохинон в молярных концентрациях, находящихся в отношении 1 : 35. В данной работе применялся проявитель с указанным соотношением проявляющих веществ, но с повышенным количеством едкого натра (60 г/л) и с бензотриазолом (0.3 г/л) в качестве антиуалирующего вещества (МГС-1).\*

Целью настоящей работы явилось выяснение вопроса о применимости этого проявителя для обработки кино- и аэропленок отечественного производства. Было исследовано 10 сортов пленочных негативных фотографических материалов.

Известно, что общее время всей обработки, и в частности время проявления, зависит от ряда эмульсионных факторов, в том числе от состава и количества галогенного серебра в слое, от отношения желатина к серебру, от толщины слоя [5], от размеров эмульсионных микрокристаллов и т. д. В связи с этим были определены следующие характеристики светочувствительных слоев: поверхностная концентрация галогенного серебра, толщины светочувствительных слоев и размеры эмульсионных кристаллов.

Поверхностная концентрация галогенного серебра определялась Ю. А. Кракау путем аргентометрического титрования по методу Либиха—Дениже [6].

\* рН проявителя 13.6, кислотно-основная буферная емкость 0.59.

Толщина светочувствительного слоя измерялась оптиметром. Определение среднего размера эмульсионных микрокристаллов некоторых пленок производилось методом статистического подсчета зерен [7]. Оказалось, что по поверхностной концентрации галогенного серебра исследованные материалы различались примерно в 2 раза: от 5.8 до 13.5 г/м<sup>2</sup>. Толщины их эмульсионных слоев различались в небольшом диапазоне: от 16 до 25 мк.

С целью исследования фотографических свойств данных пленок, подвергнутых быстрому проявлению, были проведены сенситометрические и резольвометрические испытания по ГОСТам 2817—50 и 2819—45.

Быстрое проявление сенситограмм и резольвограмм производилось в горизонтальной кювете без перемешивания проявителя. Время проявления изменялось от 10 до 120 сек. Измерение оптических плотностей производилось на фотоэлектрическом денситометре ДФЭ-10.

Результаты испытаний приведены в табл. 1 наряду с эмульсионными характеристиками исследованных фотопленок.

В этой таблице фотографические материалы расположены в порядке уменьшения поверхностной концентрации галогенного серебра. Оказалось, что по этому принципу все исследованные материалы могут быть разбиты на 4 основные группы. Деление материалов на группы позволяет сделать вывод о целесообразности применения той или иной фотопленки для быстрой обработки. Так, кинопленка типа Б не может быть рекомендована для быстрой обработки, так как она содержит большое количество галогенного серебра, но по светочувствительности и разрешающей способности уступает пленкам II

Таблица 1  
Сенситометрические и резольвометрические характеристики изображения, полученные при проявлении фотографических пленок в быстрой проявителе МГС-1

Группа	Тип материала	Ag, г/м <sup>2</sup>	Толщина слоя, мк	Средний размер кристаллов, мк	S <sub>0.2</sub> при t <sub>пр.</sub> , сек.				D <sub>0</sub> при t <sub>пр.</sub> , сек.				R, мм <sup>-1</sup>		
					10	20	40	80	120	10	20	40		80	120
I	Б Инфра-760	13.5	20	—	14	40	110	140	190	0.04	0.07	0.16	0.25	0.40	50
		13.0	20.5	—	3.5	7.5	12	15	13	0.09	0.19	0.33	0.67	1.19	37
II	Дк А-2	12.0	19	0.78	40	110	200	300	—	0.04	0.06	0.22	0.52	0.90	54
		11.2	23	0.50	45	140	250	300	—	0.02	0.03	0.20	0.56	—	54
III	Панхром X	9.0	~25	1.0	37	80	180	250	350	0.02	0.04	0.10	0.36	0.64	50
		7.1	18	—	18	27	65	80	120	0.03	0.09	0.15	0.33	0.50	63
IV	Е МЗ	6.8	21	0.35	8	16	30	45	50	0.01	0.02	0.05	0.08	0.13	68
		6.5	16	—	11	25	45	70	140	0.01	0.08	0.20	0.28	0.46	50
		6.4	21	0.62	8.5	18	37	48	70	0.01	0.02	0.07	0.12	0.34	63
		5.8	18	0.53	9	25	40	70	90	0.01	0.02	0.09	0.13	0.22	63

группы. Кинопленки II группы, содержащие галоидное серебро в концентрации от 11 до 12 г/м<sup>2</sup>, обладают наиболее высокой светочувствительностью по сравнению с фотопленками других групп, но более низкой разрешающей способностью по сравнению с фотопленками IV группы.

Эти пленки могут быть применены для быстрого проявления, но не более 50 сек., так как при большей продолжительности проявления плотность вуали превышает допустимое значение.

Из кинопленок II группы менее всего желательно применение кинопленки А-2, как имеющей наибольшее время фиксирования. Близкими ко II группе сенситометрическими характеристиками обладает аэропленка Панхром X, но она имеет несколько меньшую разрешающую способность.

Фотографические материалы IV группы, поверхностная концентрация серебра которых изменяется в пределах 5.8—7.2 г/м<sup>2</sup>, обладают, как правило, более высокой разрешающей способностью (63—68 мм<sup>-1</sup>). Из этой группы кинопленка типа В вряд ли может быть рекомендована для использования в сочетании с проявителем данного состава, ибо она обладает разрешающей способностью, более низкой, чем пленки I группы.

Из пленок IV группы наибольшей разрешающей способностью обладает кинопленка МЗ. Пленка типа Е, свойства которой были описаны ранее [8], выделяется из пленок IV группы сочетанием высокой разрешающей способности и сравнительно высокой светочувствительности.

По времени проявления до достижения максимального значения светочувствительности фотографические материалы IV группы можно разбить на две подгруппы. Пленки одной из этих подгрупп, обладающих большей светочувствительностью, можно проявлять в данном проявителе не больше 80 сек., пленки другой подгруппы могут проявляться и более продолжительное время (до 120 сек.).

Целесообразно сравнить данные, полученные при быстром и обычном проявлении на одних и тех же светочувствительных материалах. Прежде всего представляет интерес сравнить значения светочувствительности, получаемые в разных проявителях при одинаковых коэффициентах контрастности. Для этого действие быстрого проявителя было сравнено с действием стандартных проявителей №№ 1 и 2. Из трех исследованных проявителей два — МГС-1 и № 1 — являются забуференными, а № 2 — малоабуференным. Оказалось, что при проявлении высококонтрастных пленок из групп II и III в быстром проявителе, как правило, получается в 2 и более раз большая светочувствительность, чем в проявителе № 1, но меньшая, чем в проявителе № 2 (рис. 1). Исключением является кинопленка А-2, при применении кото-

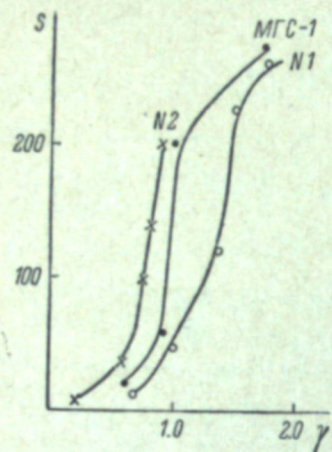


Рис. 1. Зависимость светочувствительности от коэффициента контрастности при проявлении кинопленки из II группы в различных проявителях.

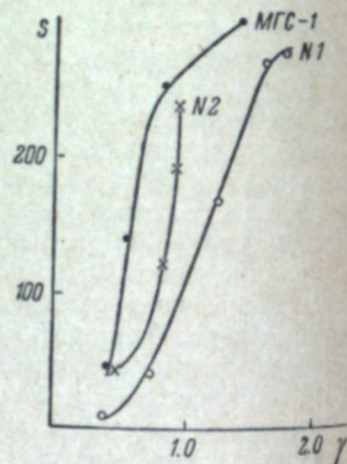


Рис. 2. Зависимость светочувствительности от коэффициента контрастности при проявлении кинопленки А-2 в различных проявителях.

рой в быстром проявителе получается более высокая светочувствительность, чем в обоих других (рис. 2).

Полученные результаты подтверждают данные С. Г. Богданова и Н. В. Поляковой [9], что при проявлении до одинаковых коэффициентов контрастности в незабуференных проявителях получается за счет длительного проявления, как правило, более высокая светочувствительность, чем в забуференных проявителях.

При сравнении друг с другом забуференных проявителей большая светочувствительность достигается в том проявителе, который имеет более высокий восстановительный потенциал [10], в данном случае МГС-1.

При использовании фотографических материалов других групп не наблюдается заметного различия в светочувствительности в зависимости от применяемого проявителя. Исключением является кинопленка типа Е, для которой в трех исследованных проявителях получаются различные значения светочувствительности (рис. 3).

Большая светочувствительность по сравнению с проявителем МГС-1 получается в проявителе № 2, начиная с  $\gamma > 0.4$ , а в проявителе № 1 с  $\gamma > 0.8$ . При этом в обоих случаях различие в светочувствительности возрастает с увеличением коэффициента контрастности. Если рассматривать результаты проявления, полу-

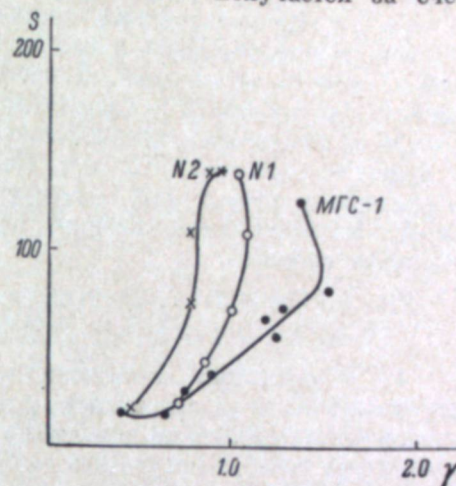


Рис. 3. Зависимость светочувствительности от коэффициента контрастности при проявлении кинопленки типа Е в различных проявителях.

чаемые при одинаковом значении светочувствительности, то оказывается, что при этих условиях в проявителе МГС-1 получается наиболее высокий коэффициент контрастности. Это дает возможность применять быстрое проявление кинопленки типа Е в тех случаях, когда требуется получение высококонтрастного изображения, как например в микрофотографии.

Значения разрешающей способности различных пленок в трех вышеупомянутых проявителях при одинаковых значениях коэффициента контрастности представлены в табл. 2. Данные табл. 2 показывают, что колебания в значениях разрешающей способности в проявителях МГС-1 и № 1 практически незначительны.

В проявителе № 2 наблюдается некоторая тенденция к снижению разрешающей способности.

Резкость фотографического изображения определялась по методу, предложенному Ю. К. Вифанским и Ю. Н. Гороховским [11]. Оказалось, что эта величина, определенная для кинопленки Дк в проявителях МГС-1

Таблица 2

Разрешающая способность различных фотографических материалов в зависимости от применяемого проявителя

Материал	R, мм <sup>-1</sup>		
	МГС-1	№ 1	№ 2
Инфра-760 . . . . .	37	34	—
Дк . . . . .	54	54	50
А-2 . . . . .	54	54	43
Панхром X . . . . .	50	54	47
Е . . . . .	63	58	58
МЗ . . . . .	68	63	54
В . . . . .	50	50	50
Панхром XI . . . . .	63	68	68
АМ . . . . .	63	54	58

и № 2, незначительно зависит от применяемого проявителя: более высокая резкость изображения получается при проявлении в проявителе МГС-1.

В заключение проявитель МГС-1 был подвергнут практическим испытаниям. С этой целью различные сорта киноплёнок подвергались экспонированию в условиях их практического использования, в частности, с помощью перископического длиннофокусного фотоаппарата ПДФ [12]. Обработка производилась в малогабаритном образце поибора для быстрой обработки киноплёнки. В качестве быстрого фиксажа применялся раствор гипосульфита с хлористым аммонием. Общее время, затрачиваемое на проявление, просветление и промывку 1.5 метров киноплёнки в приборе, составляет 5.5 мин. Позитивные изображения, полученные с различных плёнок, обработанных быстрым способом, не уступают по своему качеству изображениям, полученным с плёнок, обработанных обычным способом.

### Выводы

1. На основании проведенного исследования быстрого проявления различных кино- и аэроплёнок отечественного производства светочувствительные материалы по количеству содержащегося в эмульсионном слое галоидного серебра могут быть разбиты на 5 групп. Распределение фотографических материалов по группам дает возможность рационального выбора предназначенных для быстрой обработки материалов в зависимости от условий их экспонирования и от предъявляемых требований.

2. Наибольшее различие в светочувствительности, полученной при быстром и обычном проявлении до одинаковых значений коэффициента контрастности, наблюдается при применении высокочувствительных материалов. При проявлении в быстром, рекомендованном нами проявителе получается более высокая светочувствительность по сравнению с забуференным проявителем (№ 1), но более низкая, чем в незабуференном проявителе (№ 2). Разрешающая способность не зависит, как правило, от способа обработки.

3. Качество фотографического изображения, получаемое при быстрой обработке киноплёнок, не уступает качеству изображения при обычной обработке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. П. И. Левина, В. А. Вейденбах, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 5, 20, 1960.
2. В. А. Вейденбах, П. И. Левина, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 5, 241, 1960.
3. П. И. Левина, В. А. Вейденбах, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 5, 334, 1960.
4. П. И. Левина, В. А. Вейденбах, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 164, 1961.
5. В. Л. Зеликман, Техника кино и телевид., 4, вып. 2, 9, 1960.
6. И. М. Кольтгоф, В. А. Стенгер. Объемный анализ. Госхимиздат, М., 348, 1952.
7. К. Миз. Теория фотографического процесса. ГТТИ, М., 35, 1949.
8. А. О. Кондахчан, С. А. Верховец, Г. Г. Шевяков, Техника кино и телевид., 3, вып. 11, 16, 1959.
9. С. Г. Богданов, Н. В. Полякова, Журн. прикл. химии, 23, 702, 1950.
10. С. Г. Богданов, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 117—124, 1961.
11. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, настоящий сборник, 58.
12. А. А. Сыров. Наземное фотографирование. Воениздат, М., 145—157, 1956.

Г. Г. ГРИБАКИН, Г. А. ИСТОМИН, З. Л. ПЕТРУШКИНА

### СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ РАССЕЯНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА В ЭМУЛЬСИОННОМ СЛОЕ

(АВТОРЕФЕРАТ)

Передача мелких деталей и резкость изображения определяются совместным влиянием рассеяния света и его отражением от подложки фотографического материала. Имеющиеся данные показывают, что для современных тонкослойных эмульсий черно-белых и цветных фотографических материалов влияние ореола отражения приобретает решающее значение. Отсюда возникает необходимость в правильной количественной оценке, как совместного влияния рассеяния света и ореола отражения на качество изображения, так и их дифференцированного измерения.

Разработанная в НИКФИ методика позволяет весьма простыми средствами решить обе эти задачи и исключить ограничения, присущие способам, предложенным Фризером для измерения рассеяния света. Тест-объект НИКФИ состоит из серии изолированных черных полосок шириной 12.5, 25, 50 и 100 мк, расположенных на светлом фоне. Это позволяет полностью выявить эффект рассеяния и отражения света от подложки, так как расстояние между полосками одного размера достаточно велико: оно равно их 10-кратной ширине.

Фризер использует два типа тест-объектов. Первый тип: двойная щель — черная полоска шириной 15 мк, окруженная с обеих сторон светлым фоном шириной 80 мк. Второй тип: одинарная щель, — светлая полоска шириной 30 мк, окруженная темным фоном. В обоих случаях практически измеряется только диффузно рассеянный свет, поскольку сама схема тест-объекта ограничивает влияние ореола отражения. Это очевидно, если учесть, что максимум ореола отражения находится на расстоянии, приблизительно равном удвоенной толщине основы фотографического материала. Для обычной киноплёнки это составляет около 250 мк, что находится далеко за пределами возможных измерений с тест-объектами Фризера.

Анализ большого количества экспериментальных данных, полученных по методу НИКФИ для самых разнообразных отечественных и зарубежных черно-белых и цветных фотокиноматериалов отчетливо показывает, что простая экспоненциальная зависимость, обусловленная только рассеянием света в эмульсионном слое, практически никогда не наблюдается. В частности, это имеет место и для такой фотоплёнки, как например Изопан-Ф, Агфа (17° ДИН), когда, по данным Фризера, должна хорошо выполняться простая зависимость.

Для случая более сложной экспоненциальной зависимости, описывающей рассеяние света при помощи трех параметров, Фризером используется тест-объект второго типа — светлая полоска на темном фоне. Нами произведено сопоставление результатов измерений, полученных различными способами: с тест-объектом НИКФИ и по расширению изображения светлой полоски в полном соответствии с методом Фризера.

Удовлетворительное совпадение результатов наблюдается для фотографических материалов с хорошей противореальной защитой и только для наиболее мелких деталей (порядка 12.5 и 25 мк), когда преобладающую роль играет рассеяние света. Однако и в этом случае характеристики фотографических слоев, по данным метода Фризера, получаются несколько улучшенными. Для более крупных деталей (50—100 мк) наблюдаются весьма существенные для практики расхождения, которые становятся тем большими, чем тоньше и прозрачнее эмульсионный слой и чем хуже его противореальная защита.

Таким образом, следует констатировать, что при оценке физических характеристик фотографических материалов необходимо учитывать совместное влияние двух факторов: рассеяния света в слое и его отражения от подложки. В качестве численной характеристики следует выбрать критерий, который, в отличие от константы Фризера, в оптимальной степени учитывал бы этот совместный эффект. Как показано ранее (см. автореферат Г. А. Истомина «Объективный критерий информационной способности» в настоящем сборнике), применение диффузиметрического коэффициента позволяет успешно решить эту задачу с хорошим соответствием визуальному восприятию изображения.

В случае необходимости дифференцированной количественной оценки рассеяния света в слое и ореола отражения может быть использован графоаналитический метод, разработанный одним из авторов данного сообщения. Это позволяет описать любую функциональную зависимость: функцию контрастности для серии черных полосок, функцию распределения для светящейся линии или точки, пограничную (краевую) функцию для полуплоскости или передаточную (контрастно-частотную) функцию — при помощи параметров  $K_1$ ,  $K_2$  и  $\rho$ . В отличие от физической интерпретации Фризера мы даем этим параметрам следующую интерпретацию: величина  $K_1$  определяет преимущественно рассеяние в слое,  $K_2$  характеризует ореол отражения, а параметр  $\rho$  — удельное значение первого фактора.

В. Л. ЗЕЛИКМАН, Ф. С. ШЕРМАН, В. А. ДМИТРИЕВА,  
Е. Б. КОНДРАТЬЕВА

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФFUЗИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗКОСТИ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСЛОЙНЫХ КИНОФОТОПЛЕНОК

### Введение

Усовершенствование кинофотоплёнок как в СССР, так и за рубежом в последние годы было связано с понижением толщины эмульсионного слоя и соответственно с повышением плотности упаковки микрокристаллов галогенида серебра [1].

С уменьшением толщины эмульсионного слоя при сохранении неизменным количества галогенида серебра повышаются разрешающая способность и резкость фотографического изображения. Это происходит в результате сближения эмульсионных микрокристаллов между собой и вследствие этого, как показали И. Р. Протас и П. Х. Прусс [2], сокращения пути пробега рассеянного света в слое до его полного поглощения.

Положение о преимуществах тонкослойных кинофотоплёнок, которое еще недавно было дискуссионным [1], может в данное время считаться общепризнанным [3]. Естественно, что повышение качества фотографического изображения на тонкослойных кинофотоплёнках не должно ограничиваться повышением резкости и улучшением передачи мелких деталей малого контраста. Улучшение качества должно быть достигнуто в результате применения более мелкодисперсных и менее полидисперсных эмульсий с оптимальной степенью химической и оптической сенсibilизации, дающих меньшую динамическую зернистость, а также за счет уточнения и выбора соответствующих градационных характеристик тонкослойных плёнок с учетом кинетики их проявления.

При этом следует иметь в виду, что по мере уменьшения толщины эмульсионного слоя при постоянной поверхностной концентрации серебра выравнивающее действие так называемых выравнивающих проявителей ослабевает и в случае очень тонкого слоя (порядка 5—7 мк) совершенно исчезает независимо от степени буферности проявляющих растворов [4].

Имеется мнение о нецелесообразности и даже вредности повышения резкости фотографического изображения на отечественных кинонегативных плёнках [5, 6]. Авторы такой точки зрения считают, что при этом ухудшается зернистость изображения. Вследствие этого рекомендуется даже нарочито понижать резкость фотографического изображения с целью уменьшения его зернистости.

Вероятно, такая постановка вопроса является следствием действительно недостаточно удовлетворительной зернистости имеющегося комп-

лекта кинонегативных пленок; вследствие этого она не может быть признана принципиально правильной.

Мы считаем, учитывая весь комплекс упомянутых выше вопросов, что повышение резкости фотографического изображения наряду с уменьшением динамической зернистости является существенным элементом совершенствования технологии изготовления негативных кинофотопленок для профессионального использования, связанным главным образом с их тонкослойностью.

Переход на изготовление тонкослойных пленок связан со значительным изменением ряда их свойств и закономерностей, вследствие чего он должен решаться комплексно, с учетом всех этих особенностей, частично рассмотренных ранее [1]. В первую очередь должна быть уточнена рецептура проявляющих растворов и в связи с понижением содержания желатина сохранены или улучшены физико-механические свойства эмульсионного слоя.

Изготовление тонкослойных кинонегативных пленок является принципиально новым вопросом, и технология изготовления таких пленок еще полностью не отработана. Вследствие этого в первую очередь интересно решение принципиальных вопросов, связанных с главнейшими условиями формирования таких пленок независимо от применяемых методов синтеза эмульсии (аммиачный, безаммиачный), методов извлечения твердой фазы (центрифугирование, сепарирование, седиментация, коагуляция и др.) и методов полива [7]. Последние вопросы сами по себе также чрезвычайно важны, но они требуют самостоятельного решения.

К числу главнейших условий формирования светочувствительного слоя, рассматриваемых в данном сообщении, относятся обоснование выбора плотности упаковки галогенида серебра или весового соотношения желатина и серебра (в пересчете на металлическое) в эмульсионном слое  $\rho^*$  для кинонегативных пленок и обоснование выбора характера и оптической плотности противоореальной окраски основы, роль которой для тонкослойных пленок, по сравнению с пленками обычной толщины, значительно возрастает.

#### Методика исследования

За последние годы различными авторами [3, 8—10] были рассмотрены существующие и предложены новые методы оценки резкости фотографического изображения. Для выбора оптимальных условий формирования тонкослойных кинофотопленок с повышенной резкостью фотографического изображения нами был применен диффузиметрический метод, разработанный Г. А. Истином с сотрудниками [3, 11, 12]. Для данной цели главное преимущество этого метода заключается в возможности дифференциации по кривой функции контрастности (зависимость  $\lg \frac{I}{I_0}$  от ширины штриха миры) влияния рассеяния света в слое и влияния ореола отражения от подложки [13].

Данный метод доступен для широкого использования, так как он предусматривает применение существующей аппаратуры (сенситометр ЦС-2 в сочетании со специальным тест-объектом, микрофотометр МФ-2). Воспроизводимость результатов удовлетворительна, составляет  $\pm 5\%$ . Следует все же отметить чрезмерную трудоемкость данного метода и жалательность его дальнейшего упрощения.

Конкретные условия испытаний были следующими. Экспонирование диффузограмм осуществлялось на сенситометре ЦС-2 при  $T_c = 6500^\circ \text{K}$  и при минимальной щели. В зависимости от светочувствительности испытывавшихся пленок использовались дополнительные нейтрально-серые светофильтры с различной оптической плотностью (0.6 и 0.3). Проявление

осуществлялось в проявителе № 2 по ГОСТу при  $20^\circ \text{C}$  в течение 12 мин. Измерение оптических плотностей производилось на микрофотометре МФ-2 при размере измерительной щели  $6 \times 670 \text{ мк}$ . Параллельно определялись сенситометрические характеристики по ГОСТу 2817-50, а также разрешающая способность исследовавшихся образцов пленок.

#### Экспериментальная часть

Исследовались панхроматические негативные кинофотопленки разной степени дисперсности ( $\bar{a}$  равно 0.7 и  $0.3 \text{ мк}^2$ ), политые с различной плотностью упаковки галогенида серебра ( $\rho^*$  от 0.5—0.75 до 6.0). Одновременно на пленке со средним размером микрокристаллов  $\bar{a} = 0.3 \text{ мк}^2$  изучалось влияние суммарной оптической плотности прокраски противоореальной основы при неизменной ее спектральной кривой поглощения. Влияние последней изучалось на этом же типе эмульсии применительно к более далекой изопанхроматической сенсбилизации.

Влияние  $\rho^*$  в пределах 0.75—6.0 на диффузиметрические показатели безаммиачной кинонегативной пленки высокой светочувствительности ( $\bar{a} = 0.7 \text{ мк}^2$ ), условно обозначенной шифром В-3, показано в табл. 1 и на рис. 1. В таблице приведены также сенситометрические параметры этой пленки.

Зависимость диффузиметрических показателей от изучавшегося фактора — величины  $\rho^*$  для каждой ширины штриха миры в отдельности

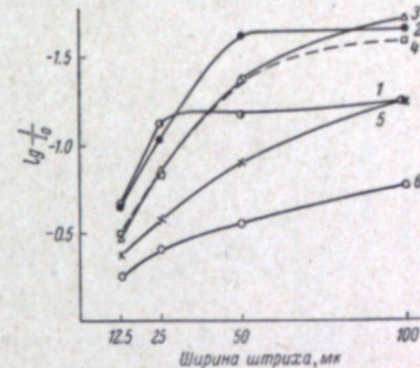


Рис. 1. Результаты диффузиметрических испытаний лабораторных образцов кинонегативной пленки высокой светочувствительности В-3 с различной величиной  $\rho^*$  (полив на грунт с  $a \cong 0.03 \text{ мк}^2$ , толщина грунта 3 мк, основа без противоореальной прокраски).

1 —  $\rho^* = 0.75$  (толщина грунта 2 мк); 2 — 1.0; 3 — 1.25; 4 — 1.5; 5 — 3.0; 6 — 6.0.

Таблица 1  
Влияние  $\rho^*$  на резкость фотографического изображения образцов кинонегативной пленки В-3 (полито на неокрашенную основу с мелкозернистым грунтом, проявитель № 2 по ГОСТу; время проявления 12 мин.)

Номер образца	$\rho^*$	Сенситометрические параметры при $T_c = 5000^\circ \text{K}$			Функция контрастности — $\lg \frac{I}{I_0}$ при ширине штриха миры				Диффузиметрический коэффициент $K_{1,0}$	$R, \text{ мк}^{-1}$	Толщина эмульсионного слоя $h, \text{ мк}$	Нанос <sup>1</sup> металлического серебра в осевом слое $c_{\text{Ag}}, \text{ г/м}^2$
		$S_{0,1}$	$\gamma$	$D_0$	12.5 мк	25 мк	50 мк	100 мк				
1	0.75	150	0.82	0.05	0.67	1.13	1.19	1.27	21.5	105	5.5	4.2
2	1.00	200	1.45	0.03	0.65	1.04	1.64	1.69	24	105	12.0	8.8
3	1.25	210	1.62	0.08	0.47	0.87	1.39	1.75	31	85	15.5	10.4
4	1.50	210	1.45	0.09	0.49	0.86	1.39	1.61	31	85	16.5	9.6
5	3.00	245	1.07	0.09	0.38	0.59	0.91	1.27	60	77	17.0	5.5
6	6.00	270	0.93	0.05	0.25	0.41	0.56	0.79	155	77	19.5	3.5

<sup>1</sup> Включая толщину защитного слоя  $\sim 1 \text{ мк}$  и толщину грунта  $\sim 3 \text{ мк}$  (в образце № 1  $\sim 2 \text{ мк}$ ).

<sup>2</sup> Рассчитан по уравнению:  $c_{\text{Ag}} = \frac{h}{0.75\rho^* + 0.27}$  (так же и в следующих таблицах).

Таблица 2

Влияние  $\rho^*$  на резкость фотографического изображения образцов кинонегативной пленки АМ-3 (полито на противоореольную основу с  $D=0.23$ , без грунта, проявитель № 2 по ГОСТу; время проявления 12 мин.)

Номер образца	$\rho^*$	Сенситометрические параметры при $T_c = 5000^\circ \text{K}$			Функция контрастности — $\lg \frac{I}{I_0}$ при ширине штриха $\mu\text{м}$				Диффузметрический коэффициент $K_{1.0}$	$R, \text{мм}^{-1}$	Толщина эмульсионного слоя $h, \mu\text{м}$	Нанос металла-серебра $c_{Ag}, \text{г/м}^2$
		$S_{a,2}$	$\gamma$	$D_0$	12.5 мк	25 мк	50 мк	100 мк				
1	0.5	55	1.36	0.07	0.61	1.24	1.50	1.60	18.5	125	4.5	5.4
2	1.0	64	1.18	0.01	0.57	1.10	1.56	1.66	22.0	125	8.0	6.8
3	1.3	65	1.14	0.01	0.46	0.99	1.44	1.66	25.5	116	8.2	5.8
4	1.5	62	1.10	0.02	0.50	0.94	1.39	1.61	24.0	108	10.7	6.9
5	1.75	55	1.16	0.02	0.45	0.86	1.27	1.52	26.0	92	7.7	4.2
6	2.0	55	1.16	0.01	0.42	0.82	1.28	1.61	33.0	100	12.0	6.2
7	3.0	65	1.20	0.01	0.38	0.71	1.14	1.46	40.0	92	11.5	4.2
8	4.0	65	1.20	0.01	0.32	0.61	0.97	1.50	53.0	85	17.0	4.9
9	6.0	68	0.90	0.02	0.25	0.45	0.79	1.24	69.0	92	18.0	3.6

1 Включая толщину защитного слоя  $\sim 1 \mu\text{м}$ .

показана на рис. 2. В применявшихся условиях опыта (основа без противоореольной окраски, противоореольный мелкозернистый грунт с  $\bar{a}=0.03 \mu\text{м}^2$  толщиной 3 мк) в качестве оптимального можно принять  $\rho^* \cong 1.0$ .

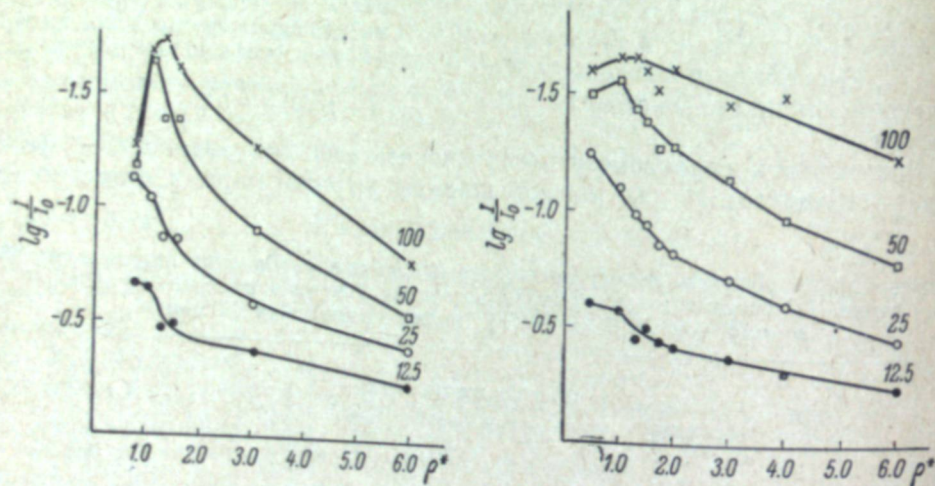


Рис. 2. Зависимость диффузметрической характеристики лабораторных образцов кинонегативной пленки высокой светочувствительности В-3 от величины  $\rho^*$  при различной ширине штриха миры (проставлена на кривых, мк).

Рис. 3. Зависимость диффузметрической характеристики лабораторных образцов кинонегативной пленки средней светочувствительности АМ-3 от величины  $\rho^*$  при различной ширине штриха миры (проставлена на кривых, мк).

Влияние  $\rho^*$  в пределах 0.5—6.0 на диффузметрические показатели безаммиачной кинонегативной пленки средней чувствительности ( $\bar{a}=0.3 \mu\text{м}^2$ ), условно обозначенной шифром АМ-3, для каждой ширины штриха миры в отдельности показано в табл. 2 и на рис. 3. В таблице приведены также сенситометрические параметры этих образцов пленки. В применявшихся условиях опыта (противоореольная основа с  $D=0.23$ , без грунта) в качестве оптимального можно принять  $\rho^*=1.3$ .

Сравнительная оценка обеих исследованных выше кинонегативных пленок разной дисперсности по величине диффузметрического коэффициента  $K_{1.0}$  в зависимости от величины  $\rho^*$  дана на рис. 4. Из рисунка видно, что изменение  $K_{1.0}$  подтверждает обоснованность использования для кинонегативных пленок интервала  $\rho^*$  от 4 до 5 и целесообразность перехода на интервал  $\rho^*$  от 1 до 2, соответствующий тонкослойным кинонегативным пленкам.

Значение противоореольной защиты эмульсионного слоя возрастает с понижением  $\rho^*$ , притом тем резче, чем мелкодисперснее пленка. Для кинонегативных черно-белых пленок принята противоореольная защита

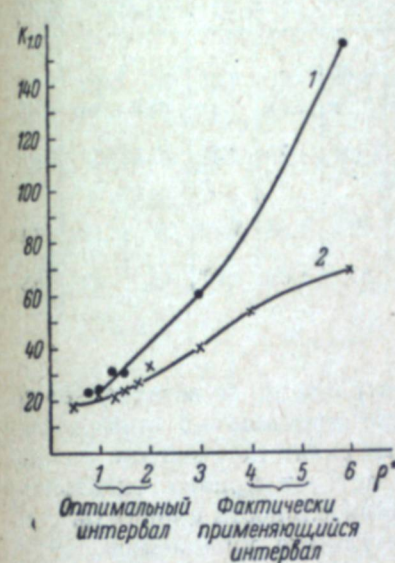


Рис. 4. Зависимость диффузметрического коэффициента  $K_{1.0}$  от  $\rho^*$  для лабораторных образцов кинонегативных пленок.

1 — высокой (В-3 с  $\bar{a} \cong 0.7 \mu\text{м}^2$ ); 2 — средней (АМ-3 с  $\bar{a} \cong 0.3 \mu\text{м}^2$ ) светочувствительности.

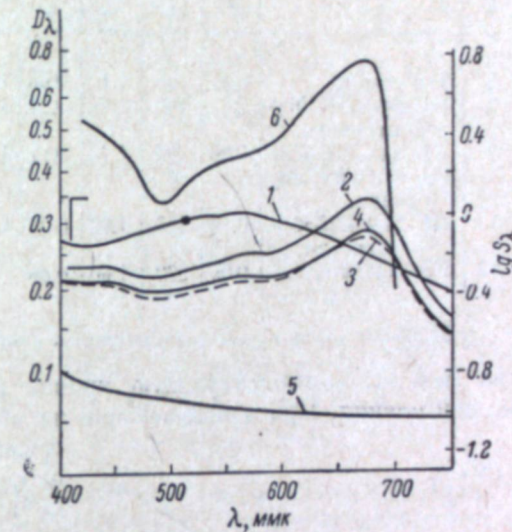


Рис. 5. Кривые поглощения лабораторных образцов основы с различными красителями.

1 — нигрозин; 2 — рекомендуемая смесь красителей ПК-84+ПК-36+нигрозин; 3 — смесь красителей ПК-84+ПК-73+ПК-36+нигрозин; 4 — смесь, аналогичная смеси 2, но с уменьшенной на 25% концентрацией красителей; 5 — неокрашенная основа; 6 — кривая спектральной чувствительности изопанхроматической пленки  $S_\lambda$ .

в виде окраски основы в массе, для чего соответствующий краситель или смесь красителей вводится в раствор эфира целлюлозы.

При выборе условий противоореольной окраски основы учитываются два фактора: спектральный характер поглощения красителя и суммарная оптическая плотность окраски, необходимая для обеспечения достаточного противоореольного действия. Первый фактор играет чрезвычайно существенную роль, но до сего времени он часто недооценивался. Идеальным условием его использования является полное соответствие спектральной кривой поглощения противоореольного красителя кривой спектральной чувствительности эмульсионного слоя, что неоднократно отмечалось И. И. Левкоевым. В данной работе проведено диффузметрическое исследование эффективности влияния этого фактора.

Для изопанхроматической фотопленки ( $\bar{a} \cong 0.3 \mu\text{м}^2$ ,  $\rho^*=1.3$ ) с длинноволновой сенсбилизацией до  $\lambda \cong 710 \mu\text{м}$  и максимумом сенсбилизации при  $\lambda \cong 680 \mu\text{м}$  была разработана специальная смесь красителей ПК-84, ПК-36<sup>1</sup> и нигрозина [14], позволяющая получить кривую светопоглоще-

<sup>1</sup> Противоореольные красители ПК-84 (2,2'-диметил-4,4'-диоксиэтиламино-2"-хлор-трифенилметенхлорид) и ПК-36 (2-[2'(4"-диметиламинофенил)-этилен]-1,3,3-триметилндолин хлорид) синтезированы в НИИОПИКе.

Таблица 3

Влияние различной противоореальной окраски основы на резкость фотографического изображения образцов изопанхроматической фотопленки (полив без грунта, проявитель УП-2; время проявления 8 мин.)

Номер образца	Противоореальная окраска основы		Сенситометрические параметры при $T_c = 5000^\circ K$			Функция контрастности $-\lg \frac{I}{I_0}$ при ширине штриха микры				Диффузиметрический коэффициент $K_{1,0}$	Толщина эмульсионного слоя $A, \mu k$	Нанос металлического серебра $c_{Ag}, \text{г/м}^2$
	красители или смеси красителей	$D_{окр.}$	$S_{6,3}$	$\gamma$	$D_0$	12.5 мк	25 мк	50 мк	100 мк			
1	Нигрозин.	0.27	250	1.5	0.05	0.53	1.08	1.62	2.08	25	13	8.9
2	ПК-84+ПК-36+ +нигрозин.	0.21	400	1.47	0.11	0.60	1.08	1.72	2.47	20.5	14	9.6
3	ПК-84+ПК-73+ +ПК-36+нигрозин.	0.20	290	1.45	0.11	0.56	1.01	1.73	2.21	25.5	14	9.6
4	ПК-84+ПК-36+ +нигрозин.	0.16	200	1.62	0.07	0.47	0.94	1.54	1.90	27	12	8.1
5	Без красителя.	0.05	200	1.60	0.08	0.44	0.82	1.09	1.17	38	13	8.9

<sup>1</sup> Включая толщину защитного слоя  $\sim 1$  мк.

ния основы, соответствующую кривой спектральной чувствительности данной пленки. При использовании же обычно применяемой окраски нигрозином кривая поглощения основы не соответствует кривой спектральной чувствительности пленки (рис. 5).

В результате улучшения диффузиметрических показателей при использовании новой противоореальной окраски основы, показанных в табл. 3 и на рис. 6, был получен исключительно резкий эффект: диффузиметрический коэффициент  $K_{1,0}$  понизился с 25 (прокраска нигрозином) до 20.5 при одновременном понижении суммарной оптической плотности окраски основы с 0.27 до 0.21.

В случае кинегативных пленок с коротковолновой сенсбилизацией, соответствующей киноплёнке АМ-2, окраска нигрозином может считаться допустимой, хотя максимумы кривых (605 и 560 мкм) различаются и в этом случае на 55 мкм (рис. 7). Вследствие этого в данном случае диффузиметрическое исследование было проведено лишь в отношении установления минимально достаточной оптической

плотности противоореальной окраски основы, а также в отношении выявления противоореального влияния мелкозернистого грунта с  $\bar{a} \cong 0.03 \text{ мк}^2$  при толщине 2 мк. Опыты были проведены на кинегативной пленке средней светочувствительности АМ-3 ( $\bar{a} \cong 0.3 \text{ мк}^2$ ) при оптимальном значении  $\rho^* \cong 1.3$ .

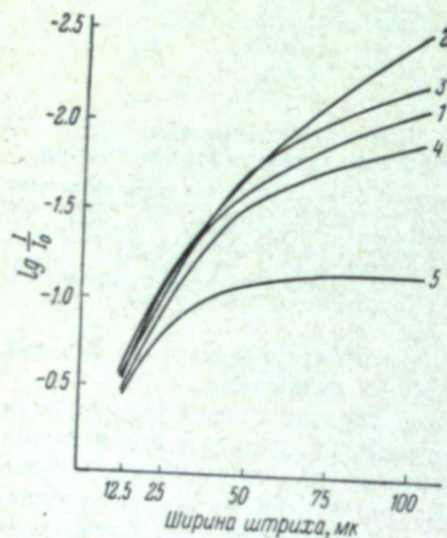


Рис. 6. Результаты диффузиметрических испытаний лабораторных образцов изопанхроматической фотопленки на неокрашенной основе (5), на основе с нигрозином (1), на основе с рекомендуемой смесью красителей (2) и на основе с различными вариантами красителей (3-4).

Таблица 4

Влияние оптической плотности противоореальной прокраски основы и наличия особо мелкозернистого грунта на резкость фотографического изображения образцов кинегативной пленки АМ-3 (проявитель № 2 по ГОСТу; время проявления 12 мин.)

Номер образца	Оптическая плотность прокраски основы	Наличие грунта	Сенситометрические параметры при $T_c = 5000^\circ K$			Функция контрастности $-\lg \frac{I}{I_0}$ при ширине штриха микры				Диффузиметрический коэффициент $K_{1,0}$	$R, \text{мк}^{-1}$	Толщина эмульсионного слоя $A, \mu k$	Нанос металлического серебра $c_{Ag}, \text{г/м}^2$
			$S_{6,3}$	$\gamma$	$D_0$ за вычетом окраски	12.5 мк	25 мк	50 мк	100 мк				
1	0.05 (не прокрашено)	Без грунта.	100	1.04	0.09	0.26	0.45	0.88	0.97	123	125	6.5	4.4
2	0.16	То же.	100	0.95	0.11	0.37	0.62	1.17	1.39	40.5	125	5	3.2
3	0.23	»	65	1.14	0.01	0.46	0.99	1.44	1.66	25.5	116	8.2	5.8
4	0.34	»	80	1.02	0.16	0.63	1.18	2.04	2.31	21.5	125	8.5	6.0
5	0.05 (не прокрашено)	С грунтом.	120	1.15	0.09	0.48	0.85	1.12	1.14	34.5	125	8.3	4.2
6	0.16	То же.	120	1.30	0.12	0.51	1.19	1.73	1.99	24	140	9.6	5.3
7	0.34	»	80	1.02	0.23	0.60	1.22	1.92	2.59	20.5	140	9	4.8

<sup>1</sup> Включая толщину защитного слоя  $\sim 1$  мк и грунта  $\sim 2$  мк.

Влияние плотности противоореальной окраски основы в пределах от 0 до 0.34 как без грунта, так и с грунтом на диффузиметрические показате-

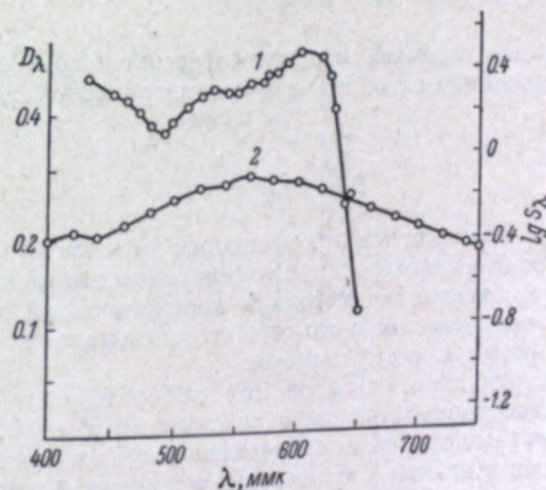


Рис. 7. Кривые спектральной чувствительности киноггативной пленки АМ-2 и лабораторных образцов тонкослойных киноплёнок высокой и средней светочувствительности (1) и кривая поглощения противоореальной основы с нигрозином (2).

тели безаммиачной киноггативной пленки средней светочувствительности показано в табл. 4 и на рис. 8 для каждой ширины штриха микры в отдельности.

Влияние степени окраски основы, как видно из этих данных, сказывается наиболее резко при отсутствии грунта, в то время как положитель-



ное влияние грунта более заметно выявляется при меньшей противоореальной окраске основы. Это в некоторой степени иллюстрируется зависимостью диффузиметрического коэффициента  $K_{1.0}$  от степени противоореальной окраски основы как без грунта, так и с грунтом (рис. 9) Однако нужно иметь в виду, что при высоких диффузиметрических показателях пленки, имевших место в данном случае, эта зависимость может несколько

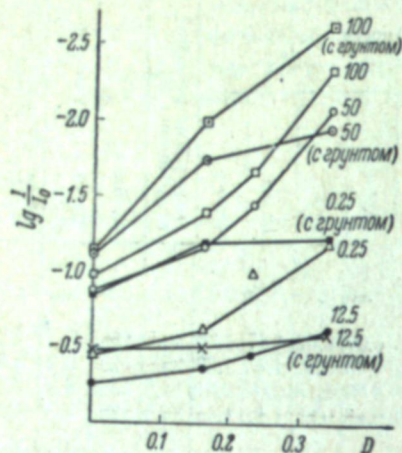


Рис. 8. Зависимость диффузиметрической характеристики лабораторных образцов кинонегативной пленки средней светочувствительности от оптической плотности противоореальной окраски основы  $D$  (при наличии или отсутствии грунта) при различной ширине штриха миры (представлена на кривых, мк).

искажать фактические свойства пленок, вследствие чего ее не следует рассматривать изолированно от общей диффузиметрической характеристики (рис. 8).

### Выводы

1. Для выбора технологических факторов синтеза фотографических эмульсий с низким  $\rho^*$  и формирования тонкослойных кинонегативных пленок использована объективная методика количественной оценки рассеяния света в эмульсионном слое и его отражения от подложки, разработанная Г. А. Истоминим с сотрудниками.

2. Диффузиметрические исследования лабораторных образцов безаммиачных кинонегативных пленок с величинами  $\rho^*$  от 0.5—0.75 до 6.0 и с двумя различными средними размерами микрокристаллов  $\bar{a}$  показали следующие предварительные оптимальные значения  $\rho^*$  для тонкослойных пленок: для пленки средней светочувствительности АМ-3 ( $\bar{a} \cong 0.3$  мк<sup>2</sup>) около 1.3 и для пленки высокой светочувствительности В-3 ( $\bar{a} \cong 0.7$  мк<sup>2</sup>) около 1.0. Это создает технически обоснованную возможность при разработке нового комплекта тонкослойных кинонегативных пленок ориентироваться на  $\rho^*$  в пределах 1—2 вместо  $\rho^*$  в существующем комплекте в пределах 4—5.

3. Диффузиметрические исследования лабораторных образцов кинонегативной тонкослойной пленки средней светочувствительности АМ-3, изготовленной с оптимальным  $\rho^* \cong 1.3$  на триацетатной основе с различной оптической плотностью противоореальной окраски, показали величину

минимально достаточной плотности противоореальной окраски  $D=0.35$  вместо обычно используемой  $\sim 0.25$ .

4. Показано, что имеющиеся значительные диффузиметрические преимущества наличия мелкозернистого грунта при отсутствии или недостаточной оптической плотности окраски противоореальной основы уменьшаются при минимально достаточной плотности ее окраски ( $D \cong 0.35$ ).

5. Показаны диффузиметрические преимущества предложенной новой противоореальной окраски основы для тонкослойных изопанхроматических кинофотопленок, повторяющей кривую их спектральной чувствительности.

Образцы кинофотопленок, исследовавшиеся в данной работе, были изготовлены на экспериментальной установке НИКФИ под руководством А. Ю. Дебердеева и в Казанском филиале НИКФИ под руководством М. И. Барро, П. И. Логак, А. И. Букина и Е. А. Красильниковой. Синтез красителей осуществлялся в НИОПИКе под руководством Л. И. Румянцевой и С. Н. Когановской. В работе участвовали следующие сотрудники НИКФИ и его Казанского филиала: М. А. Горелова, А. А. Маркман, Н. И. Самсонова, М. Н. Фоменко, П. Н. Андросова, Н. Д. Ерофеева, Л. М. Вишневецкая, Р. Старостина и А. Темербаев.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность проф. Г. А. Истомину и И. Г. Абидиной за помощь и личное участие в освоении диффузиметрической методики определения резкости, а также проф. И. И. Левкоеву за участие в выборе противоореальных красителей для окраски основы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Зеликман, Техника кино и телевид., 4, вып. 2, 9, 1960.
2. И. Р. Протас, П. Х. Прусс, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 294, 1961.
3. Г. А. Истомин, Техника кино и телевид., 5, вып. 2, 1, 1961.
4. И. Б. Блюмберг, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 5, 90, 1960.
5. И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина, Г. А. Кийлер, Г. И. Тергулов, Техника кино и телевид., 5, вып. 8, 25, 1961.
6. И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина, настоящий сборник, 50.
7. В. Л. Зеликман, С. М. Леви. Основы синтеза и полива фотографических эмульсий. Изд. «Искусство», М., 1960.
8. G. C. Higgins, L. A. Jones, JSMPT, 58, 277, 1952.
9. H. F. Nitka, A. Degg, Phot. Sci. a. Eng., 3, 1, 1959.
10. Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 382, 1961; настоящий сборник, 58.
11. Г. А. Истомин, настоящий сборник, 75.
12. Г. А. Истомин, И. Г. Абидина, З. Л. Петрушкина, настоящий сборник, 77.
13. Г. Г. Грибакин, Г. А. Истомин, З. Л. Петрушкина, настоящий сборник, 219.
14. Ф. С. Шерман, В. Л. Зеликман, Л. И. Румянцева, А. Н. Когановская, Н. С. Вульфсон. Способ получения противоореальной триацетатной основы для изопанхроматических пленок с длинноволновой сенситризацией. Авт. свид. № 159724, приоритет от 5 VI 1962. Бюлл. изобретений и товарных знаков, № 1, 64, 1964.

И. Р. ПРОТАС, П. Т. СИДОРЕНКОВА, Т. В. РЫЖКОВА

## ОБ ЭМУЛЬСИОННЫХ ФАКТОРАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ

### Введение

Разрешающая способность фотографических материалов  $R$ , характеризующая определенным образом их способность передавать мелкие детали оптического изображения, определяется в основном свойствами светочувствительного эмульсионного слоя. В большинстве работ, посвященных влиянию эмульсионных факторов на разрешающую способность слоя, обычно рассматривается зависимость величины  $R$  от размеров эмульсионных кристаллов, толщины эмульсионного слоя и концентрации в нем AgHal [1—7].

В последние годы в результате исследования природы разрешающей способности, основанного на изучении оптических, структурных и фотографических свойств эмульсий [8—14], было установлено, что, помимо перечисленных выше хорошо изученных факторов, существенное влияние на разрешающую способность слоя оказывают и другие свойства эмульсий: агрегирование эмульсионных кристаллов, их форма и толщина, оптическая сенсibilизация эмульсии и, наконец, распределение кристаллов по размерам и светочувствительности [4, 11—14]. Отметим, что на последнее еще в 1912 г. указывал Гольдберг [15].

Хорошо известно, что обычные методы синтеза эмульсий — безаммиачный и аммиачный — приводят к образованию кристаллов AgHal, различающихся дисперсией и формой. Безаммиачные эмульсии содержат более разнообразные по размерам, лучше ограниченные и более тонкие кристаллы, чем эмульсии аммиачного типа [16].

Подробное исследование разрешающей способности эмульсий различных типов показало, что при прочих равных условиях (среднем размере кристаллов, кривой распределения их по размерам, толщине слоя и концентрации в нем AgHal) слои, содержащие тонкие пластинчатые кристаллы, обладают наибольшей разрешающей способностью и что это связано с оптическими свойствами кристаллов, а именно с меньшим рассеянием света кристаллами пластинчатой формы [12, 13]. С другой стороны, существует связь между разрешающей способностью слоя и разнообразием кристаллов по размерам и светочувствительности. При оптимальных для данного слоя выдержках кристаллы AgHal, более светочувствительные, чем основная их масса, и не подвергавшиеся действию прямого света, будут участвовать в образовании изображения вследствие действия на них рассеянного

в слое света. Это приводит к размыванию изображения и уменьшению разрешающей способности слоя [13, 14].

Таким образом, оба рассматриваемых типа эмульсий — аммиачный и безаммиачный — не обладают оптимальными, с точки зрения разрешающей способности, свойствами: аммиачные — из-за большой толщины и округлой формы кристаллов, а безаммиачные — вследствие большого разнообразия кристаллов по размерам и светочувствительности.

Получению эмульсий, состоящих из однородных по размерам пластинчатых кристаллов, и исследованию их фотографических свойств посвящена эта работа.

### Экспериментальная часть

Для получения требуемых эмульсий был применен метод фракционирования безаммиачных эмульсий, основанный на частичной седиментации [12—14]. Эмульсия безаммиачного типа расплавлялась в таком количестве воды, чтобы концентрация желатина в ней была около 0.5%. Затем рВг разбавленной эмульсии доводился путем введения КВг до значений 2.7—2.8 и эмульсия помещалась в кювету, где происходило оседание кристаллов. Высота жидкости в кювете не превышала 8—10 см. Для выделения наиболее крупной фракции эмульсионных кристаллов первая седиментация продолжалась около 4 час. Через 4 час. неосевшая суспензия сливалась в другую кювету, в которой в течение 16—18 час. происходило осаждение средней фракции кристаллов. Оставшаяся суспензия, содержащая самые мелкие кристаллы, в этих опытах не использовалась.

Осевшие кристаллы каждой фракции диспергировались в желатиновом растворе. В ряде случаев отдельные фракции подвергались вторичному фракционированию.

При приготовлении эмульсионных слоев из исходных эмульсий и эмульсий фракционированных мы стремились к тому, чтобы все сравниваемые эмульсии поливались слоями примерно одинаковой толщины и имели одинаковую объемную концентрацию AgHal в слое. С этой целью фракции осевших кристаллов вначале диспергировались в небольшом объеме желатинового рас-



Рис. 1. Кривые распределения эмульсионных кристаллов по размерам. 1 — исходная эмульсия (Δ); 2 — крупная фракция (1-е фракционирование); 3 — крупная фракция (2-е фракционирование); 4 — средняя фракция (1-е фракционирование); 5 — средняя фракция (2-е фракционирование).

Эмульсия	Дисперсионные свойства			Плотность упаковки $P, \text{ г. Ag/мл}$	Сенситометрические свойства			Разрешающая способность $R, \text{ мм}^{-1}$
	средний размер $\bar{x}, \text{ мк}^2$	дисперсия $\sigma, \text{ мк}^2$	Коэффициент вариации $C_v = 100 \frac{\sigma}{\bar{x}}$		$S_{0.5}$	$\gamma$	$D_0$	
Исходная А . . . . .	0.78	0.58	75	0.32	75.0	2.45	0.17	75
Крупная фракция:								
1-е фракционирование . .	1.93	1.06	55	0.32	72.0	2.80	0.27	85
2-е фракционирование . .	1.97	1.14	58	0.32	62.0	2.30	0.25	85
Средняя фракция:								
1-е фракционирование . .	1.32	0.73	55	0.35	65.0	2.75	0.28	85
2-е фракционирование . .	1.42	0.64	45	0.34	55.0	2.85	0.36	90
Исходная В . . . . .	0.51	0.35	68	0.30	37.0	2.1	0.17	80
Средняя фракция:								
1-е фракционирование . .	0.66	0.33	50	0.30	35.0	2.3	0.27	100

творя. В полученных концентрированных эмульсиях определялось количество серебра, а далее эмульсия разбавлялась водой и, если требовалось, желатином до желаемой концентрации в ней галоидного серебра и желатина.

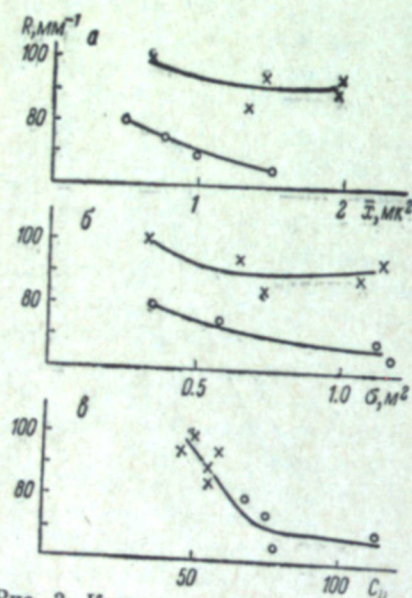


Рис. 2. Кривые зависимости разрешающей способности от средних размеров кристаллов  $\bar{x}$  (а), дисперсии  $\sigma$  (б) и коэффициента вариации  $C_v$  (в).

Кружки — исходные эмульсии; крестики — фракционированные эмульсии.

резольвометрического испытания двух исходных негативных эмульсий и полученных из них фракций. Фракционирование этих эмульсий производилось после химического созревания. Эмульсии не содержали оптических sensibilizаторов и других веществ, обычно вводимых перед

политые эмульсионные слои экспонировались в сенситометре ФСР-4 и резольвометре ФСР-5. Последний был снабжен мирой абсолютного контраста и объективом с апертурой 0.2.

Проявление полученных слоев производилось в проявителе № 1 по ГОСТу в течение 6 мин. Мы ограничились одним временем проявления, так как известно, что разрешающая способность мало изменяется с изменением продолжительности процесса, за исключением лишь первых минут проявления [17].

Дисперсионный анализ производился обычным микрофотографическим методом [18].

На рис. 1 приведены кривые распределения эмульсионных кристаллов по размерам для одной из исследованных нами эмульсий (исходной и полученных из нее фракций).

В таблице приведены усредненные результаты (среднее из 2—3 опытов) дисперсионного, сенситометрического и резольвометрического испытания

Все эмульсии сравнивались при более или менее одинаковой объемной концентрации  $\text{AgHal}$  в слое, численно равной количеству граммов  $\text{Ag}$  в 1 мл воздушно-сухого эмульсионного слоя

$$P = \frac{m}{\frac{1.74m}{6.47} + \frac{n}{1.34}},$$

где  $m$  — количество граммов  $\text{Ag}$  на килограмм эмульсии;  $n$  — количество граммов желатина на килограмм эмульсии; 1.74 — отношение молекулярных весов  $\text{AgBr}$  и  $\text{Ag}$ ; 6.47 и 1.34 — удельные веса  $\text{AgBr}$  и желатина [19].

Из таблицы следует, что, хотя средний размер кристаллов в исходных эмульсиях значительно меньше, чем в полученных из них фракциях, разрешающая способность их тем не менее на 20—25% ниже разрешающей способности фракционированных эмульсий.

Следует особенно отметить низкодисперсные фракции эмульсии А ( $\bar{x} \approx 2 \text{ мк}^2$ ), обладающие сравнительно высокой разрешающей способностью.

На рис. 2 приведены кривые  $R = f(\bar{x}, \sigma, C_v)$  для ряда исходных и фракционированных эмульсий. Из кривых рис. 2, а и б следует, что при данных значениях  $\bar{x}$  или  $\sigma$  разрешающая способность у фракционированных эмульсий значительно выше, чем у исходных (на 35—40%). Резкое падение значений  $R$  при увеличении коэффициента вариации показано на рис. 2, в.

Наблюдаемого при фракционировании понижения светочувствительности и повышения вуали (см. таблицу) можно избежать, если фракционированию подвергать эмульсии до химического созревания, а последнее производить для каждой фракции в отдельности.

Кривые кинетики химического созревания эмульсии А и полученных из нее фракций показаны на рис. 3.

Из приведенных данных следует, что максимальные значения светочувствительности для фракционированных эмульсий достигаются при меньших временах созревания, чем для исходной эмульсии, и что значи-

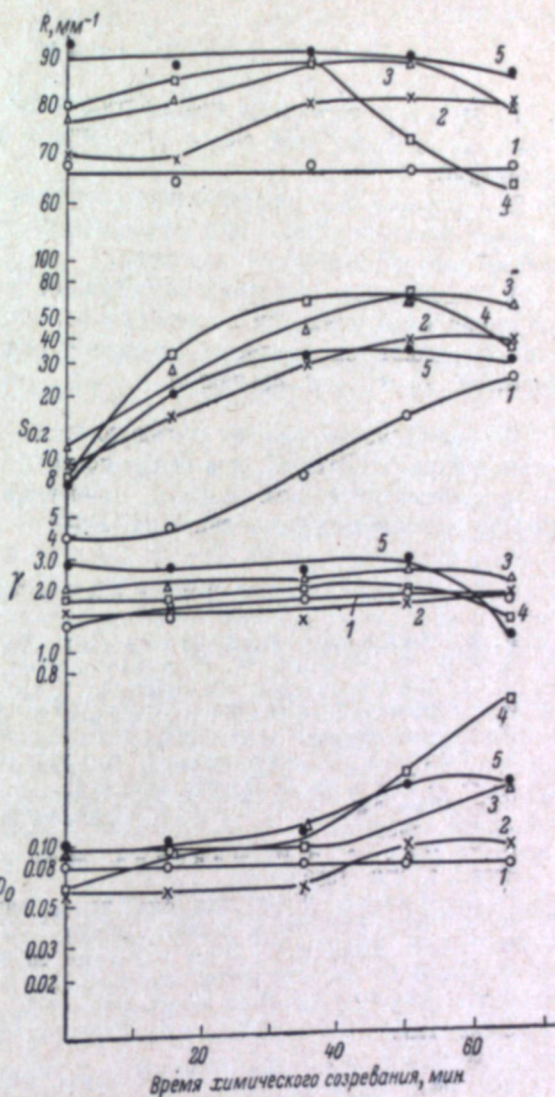


Рис. 3. Кривые кинетики химического созревания. 1 — исходная эмульсия (А); 2 — крупная фракция (1-е фракционирование); 3 — крупная фракция (2-е фракционирование); 4 — средняя фракция (1-е фракционирование); 5 — средняя фракция (2-е фракционирование).

тельный рост вуали первых наблюдается при временах созревания более длительных, чем требуется для достижения оптимальной светочувствительности.

### Выводы

1. Методом частичной седиментации выделены фракции эмульсий, содержащие более или менее однородные по размерам эмульсионные кристаллы.

2. Показано, что разрешающая способность даже наиболее низкодисперсной фракции выше, чем разрешающая способность исходной, сравнительно высокодисперсной эмульсии.

3. Сопоставлена кинетика химического созревания исходных и фракционированной эмульсий и установлено, что фракционированные эмульсии достигают оптимальных значений светочувствительности в более короткий срок, чем исходные.

В заключение выражаем большую благодарность руководству Казанского филиала НИКФИ, и в особенности А. В. Борину и М. И. Барро, за предоставление возможности проверить результаты лабораторных опытов на опытных установках НИКФИ и за ряд ценных советов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. К. В. Чибисов, Н. В. Макаров, Тр. НИКФИ, 3, 30, 1935.
2. A. P. N. Trivelli, W. F. Smith, Phot. J., 79, 630, 1939.
3. И. М. Кишинский, Тр. НИКФИ, 7, 69, 1944.
4. И. Р. Протас, В. В. Воробьева, Ю. А. Кракау, П. Х. Прусс, Усп. научн. фотогр., 1, 74, 1951.
5. A. Narath, G. Schimmel, Sci. Ind. Phot., 26, 345, 1955.
6. H. F. Nitka, A. J. Derr, Phot. Sci. a. Eng., 3, 1, 1959.
7. И. Р. Протас, П. Х. Прусс, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 6, 294, 1961.
8. П. Х. Прусс, В. И. Максина, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 259, 1959.
9. П. Х. Прусс, Журн. техн. физ., 24, 50, 1954.
10. П. Х. Прусс, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 121, 1959.
11. И. И. Брейдо, П. Х. Прусс, Журн. техн. физ., 22, 515, 1952.
12. П. Х. Прусс, настоящий сборник, 235.
13. И. Р. Протас, З. И. Грацианская, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, П. Т. Сидоренкова, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 96, 1962.
14. З. И. Грацианская, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 169, 1962.
15. E. Goldberg, Phot. J., 36, 300, 1912.
16. П. В. Мейкляр, И. Р. Протас, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, Усп. научн. фотогр., 1, 60, 1951.
17. F. Reggin, J. H. Altman, JOSA, 42, 462, 1952.
18. С. В. Чердынцев, Тр. Гос. оптич. инст., 9, 3, 1933.
19. В. Л. Зеликман, Техника кино и телевид., 4, вып. 2, 9, 1960.

П. Х. ПРУСС

## РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЯХ И ИХ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

### Введение

Рассеяние света в эмульсионных слоях фотографических материалов является основной причиной ограниченности их разрешающей способности, а также причиной ряда других специфических свойств фотографических материалов, определяющих качество передаваемого ими изображения. Поняты поэтому давно возникший интерес к вопросу о рассеянии света в эмульсионных слоях.

Как известно, до настоящего времени не существует общей теории рассеяния света частицами несферической формы. Вместе с тем современные фотографические эмульсии содержат частицы именно несферической формы. В одних эмульсиях, синтезированных по безаммиачному методу, микрокристаллы AgHal имеют пластинчатую форму, в других, синтезированных по аммиачному методу, — округлую форму, приближающуюся для крупных микрокристаллов к шарообразной [1, 2.]

Необходимо отметить, что указанные два типа эмульсий различаются не только формой микрокристаллов AgHal, но и величиной дисперсии  $\sigma$  или коэффициентом вариации  $C_v$  [2, 3], характеризующими полидисперсность эмульсий. Поэтому установленные для этих двух типов различия в рассеянии света [4—6] и в разрешающей способности [3] могли быть в значительной мере обусловлены не только различием формы микрокристаллов, но и разной полидисперсностью этих эмульсий.

Первоначальная цель этой работы состояла в том, чтобы выяснить, влияет ли форма микрокристаллов AgHal на рассеяние ими света. Положительный ответ на этот вопрос определил дальнейшее развитие работы в направлении изучения влияния формы частиц AgHal на разрешающую способность фотографических слоев.

### Методика исследования рассеяния света

Опыты, поставленные нами, были направлены на то, чтобы сопоставить закономерности однократного рассеяния света слабомутными эмульсионными слоями, различающимися только формой микрокристаллов AgHal. С этой целью более полидисперсные эмульсии, которыми являются безаммиачные эмульсии с пластинчатыми кристаллами, подвергались седиментации и разделению на фракции. Фракционирование повторялось несколько раз, с тем чтобы получить фракции, достаточно однородные по размерам микрокристаллов, близкие по однородности

к эмульсиям аммиачного типа. Для таких фракций методом микрофотографирования определялись кривые распределения микрокристаллов по их площади проекции  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = f(x)$ . Из последних вычислялись средний размер  $x$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma = \sqrt{x^2 - \bar{x}^2}$  и коэффициент вариации  $C_v = 100 \cdot \frac{\sigma}{\bar{x}}$ . Так как у аммиачных эмульсий с шарообразными частицами  $C_v \cong 50^*$  [3], то слои для исследования поливались из фракций, имеющих то же значение  $C_v \cong 50$  и такие же кривые  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = f(x)$ , что у соответствующих по  $x$  слоев аммиачных эмульсий.

Таким образом были приготовлены слои, содержащие микрокристаллы пластинчатой формы и отличающиеся от соответствующих слоев с шарообразными микрокристаллами только формой последних.

Измерялись следующие характеристики рассеяния сопоставляемых слабомутных слоев: 1) разность регулярной и интегральной плотностей слоя  $\Delta D = D_{||} - D_{\perp}$ , 2) спектральный ход рассеяния и 3) индикатриса рассеяния. Все измерения производились в естественном свете.

Выбор для характеристики рассеяния эмульсионных слоев величины  $\Delta D$  ясен из следующего. В случае непоглощающих слабомутных сред удельная мутность слоя, или показатель ослабления  $\tau$  в формуле  $I_{||} = I_0 e^{-\tau c}$ , тождественна показателю рассеяния  $\tau_r$ . Здесь  $I_0$  — интенсивность нормально падающего на слой параллельного пучка света,  $I_{||}$  — интенсивность света, вышедшего из слоя и не изменившего своего направления, а  $c$  — поверхностная концентрация диспергированного вещества в слое, выраженная в г/см<sup>2</sup>. Регулярная оптическая плотность слоя  $D_{||} = \lg \frac{I_0}{I_{||}} = \tau c \lg e$ . Следовательно, при  $c = \text{const}$ , значения  $D_{||}$  пропорциональны показателю рассеяния  $\tau_r = \tau$ . Так как эмульсионные слои могут не только рассеивать, но и поглощать падающий на них свет, то для них  $\tau \neq \tau_r$ , а  $\tau = \tau_r + \tau_n$ , где  $\tau_n$  — показатель поглощения, и  $D_{||}$  пропорционально не  $\tau_r$ , а  $\tau$ . Если представить  $\tau$  в виде суммы  $\tau = \tau'_r + \tau''_r + \tau_n$ , где  $\tau'_r$  — показатель рассеяния, учитывающий рассеяние вперед, т. е. в полусферу по направлению падающего света, а  $\tau''_r$  — показатель рассеяния, учитывающий рассеяние назад, т. е. в полусферу, обращенную навстречу падающему пучку, то в случае эмульсионных слоев

$$I_{||} = I_0 e^{-(\tau'_r + \tau''_r + \tau_n)c}$$

а интенсивность света, выходящего в переднюю полусферу, равна

$$I_{\perp} = I_0 e^{-(\tau''_r + \tau_n)c}$$

Тогда

$$D_{||} = (\tau'_r + \tau''_r + \tau_n)c \lg e, \quad D_{\perp} = (\tau''_r + \tau_n)c \lg e, \quad \text{а } \Delta D = \tau'_r c \lg e.$$

Таким образом, величина  $\Delta D$  при  $c = \text{const}$  пропорциональна показателю рассеяния  $\tau'_r$ .

Далее будет показано, что индикатрисы однократного рассеяния эмульсионных слоев имеют весьма вытянутую вперед форму. Поэтому

\* У безаммиачных эмульсий  $C_v = 80 \div 90$ .

$\tau'_r$  должно мало отличаться от  $\tau_r$ . Не преследуя целей точных измерений, мы считали  $\Delta D$  удовлетворительной характеристикой рассеяния.

Для измерения величин  $\Delta D$  слой с достаточно низкой концентрацией галоидного серебра ( $c \cong 0.8 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>2</sup>), отвечающей области линейных зависимостей  $D_{||}$ ,  $D_{\perp}$  и  $\Delta D$  от  $c$ , помещался в параллельный пучок света и его оптические плотности  $D_{\text{бл.}} \cong D_{\perp}$  и  $D_{\text{дал.}} \cong D_{||}$  измерялись с помощью селенового фотоэлемента и гальванометра ( $1.5 \cdot 10^{-10}$  а/мм/м). Фотоэлемент располагался вплотную к слою при измерении  $D_{\text{бл.}}$  и на расстоянии  $l = 250$  мм при измерении  $D_{\text{дал.}}$ . Было установлено, что при увеличении расстояния  $l$  свыше 250 мм  $D_{\text{дал.}}$  не возрастало.

Спектральный ход рассеяния определялся на спектрофотометре типа СФ-11 и в инфракрасной области спектра — на спектрофотометре ИКС-11. Одинаковых условий измерения на этих спектрофотометрах достигнуть трудно. Поэтому мы ограничились получением кривых  $D_{\text{дал.}}(\lambda)$ . Они достаточно хорошо характеризуют спектральный ход рассеяния, так как в исследованном интервале кривые  $\Delta D(\lambda)$  и  $D_{\text{дал.}}(\lambda)$  приблизительно параллельны.

Индикатрисы рассеяния измерялись с помощью фактурометра Н. Э. Ритыня и В. П. Лазарева [7] — визуального гониофотометра, дооборудованного для лабораторных измерений двумя источниками освещения: для освещения слоя и для освещения поля сравнения. Телесный угол воспринимаемого им пучка составлял 0.0006 стерадиана. Измерялись относительные яркости слоев  $B_{\alpha}$  в различных направлениях при нормальном освещении слоя.

Предварительно были установлены концентрации  $c$ , в пределах которых сохраняется линейная зависимость  $B_{\alpha} = f(c)$ . По относительным яркостям  $B_{\alpha}$  с учетом преломления на границе слой—воздух вычислялись относительные индикатрисы рассеяния  $I(\beta)$ , где  $I$  — сила света единицы объема слоя, а  $\beta$  — направление рассеяния.  $I(\beta)$  характеризуют форму усредненных индикатрис рассеяния кристаллов.

Измерениями яркостей слоев в направлениях  $\alpha = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 130, 140$  и  $150^\circ$  получены участки индикатрис, заключенные в направлениях  $\beta \approx 6-35^\circ$  и  $145-160^\circ$ . Получение более полных индикатрис связано с изменением угла падения света на эмульсионный слой. Поскольку, однако, микрокристаллы галоидного серебра имеют несферическую форму и определенно ориентированы в слое, то индикатриса рассеяния их должна зависеть от ориентации микрокристаллов относительно направления падающего света. Во время измерений нам представлялось необходимым сохранять неизменной ориентацию микрокристаллов относительно падающего пучка.

#### Влияние формы микрокристаллов AgHal на рассеяние ими света

Результаты измерений и некоторых вычислений приведены на рис. 1—8. На рис. 1 представлены кривые  $\Delta D_{c=\text{const}} = f(x)$  сопоставляемых слоев с шарообразными (1) и пластинчатыми (2) кристаллами для узкого участка спектра с  $\lambda_{\text{max}} = 550$  мкм. Эти кривые позволили получить данные о влиянии размеров и формы микрокристаллов бропосеребра на их коэффициент рассеяния. Действительно, в слое, содержащем непоглощающие частицы одинакового размера, показатель  $\tau$  связан с коэффициентом рассеяния частиц  $k_r$  соотношением

$$\tau c = k_r N l,$$

где  $N$  — число частиц в единице объема слоя;  $l$  — толщина слоя.

Из этого соотношения следует, что

$$k_p = \frac{\tau c}{Nl} = \frac{\tau v N l s}{Nl} = \tau v s.$$

Здесь  $v$  — объем частицы;  $s$  — ее удельный вес.

В случае полидисперсных эмульсионных слоев из величин  $\Delta D$ , пропорциональных  $\tau'_p$ , могут быть, очевидно, вычислены относительные средние коэффициенты рассеяния микрокристаллов AgHal

$$\bar{k}'_p = \Delta D \bar{v},$$

где  $\bar{v}$  — средний объем микрокристаллов AgHal.

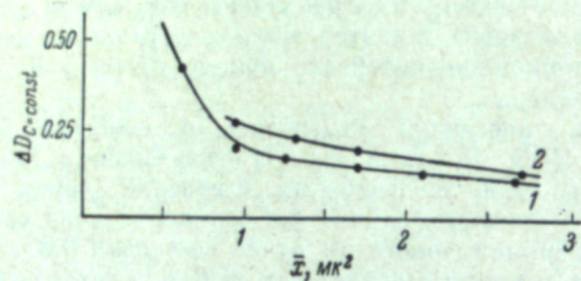


Рис. 1. Значения  $\Delta D_{c=\text{const}}$  в зависимости от  $\bar{x}$  для эмульсионных слоев с шарообразными (1) и пластинчатыми (2) микрокристаллами AgHal.

Результаты вычислений ( $\bar{v}$  определялось из кривых распределения  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = f(x)$  и данных о толщине микрокристаллов шарообразной и пластинчатой форм [2]) для сопоставляемых слоев показывают (рис. 2), что  $\bar{k}'_p$  как шарообразных (1), так и пластинчатых (2) микрокристаллов

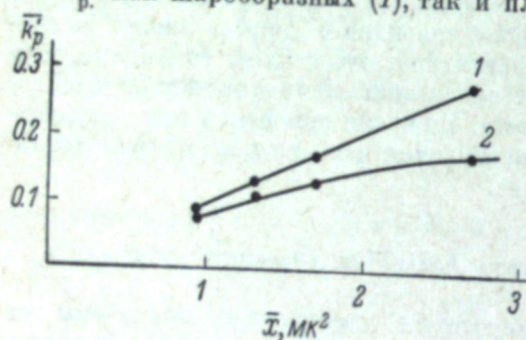


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента рассеяния шарообразных (1) и пластинчатых (2) микрокристаллов AgHal от их средней площади проекции  $\bar{x}$  в плоскости слоя.

увеличивается с увеличением  $\bar{x}$ . При этом, однако,  $\bar{k}'_p$  тонких пластинчатых кристаллов всегда меньше, чем  $\bar{k}'_p$  таких же по  $\bar{x}$ , но шарообразных кристаллов. Последнее позволяет заключить, что тонкие пластинчатые микрокристаллы AgHal характеризуются меньшими коэффициентами рассеяния, чем равные им по площади сечения, но более толстые шарообразные микрокристаллы. По коэффициенту рассеяния пластинчатые микрокристаллы как бы соответствуют более мелким шарообразным микрокристаллам AgHal.

На рис. 3 приведены 4 пары кривых спектрального хода рассеяния для разных по  $\bar{x}$  слоев. В каждой из них одна кривая (1) относится к слою с шарообразными микрокристаллами, а другая (2) — к слою с пластинчатыми микрокристаллами AgHal. Из рис. 3 следует, что с увеличением  $\bar{x}$  максимум кривых спектрального хода рассеяния слоев

обоих типов смещается в сторону больших длин волн. При этом во всех случаях для слоев с пластинчатыми кристаллами  $\lambda_{\text{max}}$  меньше, чем для слоев с шарообразными кристаллами.

Следовательно, и в отношении спектрального хода рассеяния микрокристаллы AgHal пластинчатой формы ведут себя как более мелкие микрокристаллы шарообразной формы.

На рис. 4 по измерениям в зеленом участке спектра ( $\lambda_{\text{max}} = 550$  мкм) построены индикатрисы рассеяния для 3 пар слоев. В каждой паре индикатрис внутренняя (нанесенная штрихами) относится к слою с пластинчатыми, а наружная — к слою с шарообразными микрокристаллами AgHal. Индикатрисы приведены к одинаковому относительному числу частиц в единице объема слоя, т. е. построены кривые  $I_{N=\text{const}}(\beta)$ .<sup>6</sup> На рис. 5 для большей наглядности построены кривые  $\frac{I_1}{I_2} = f(x)$ , где  $I_1 = I_{\beta=6^\circ}$ , и  $I_2 = I_{\beta=35^\circ}$ , характеризующие вытянутость индикатрис. Рис. 4 и 5 показывают, что а) усредненные индикатрисы рассеяния микрокристаллов AgHal имеют вытянутую вперед форму, б) степень вытянутости индикатрис для пластинчатых и шарообразных кристаллов увеличивается с увеличением их размеров и в) при одинаковых значениях  $\bar{x}$  индикатрисы пластинчатых кристаллов более вытянуты, чем индикатрисы шарообразных кристаллов.

Суммируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

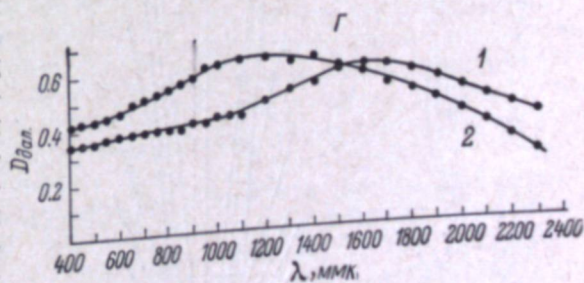
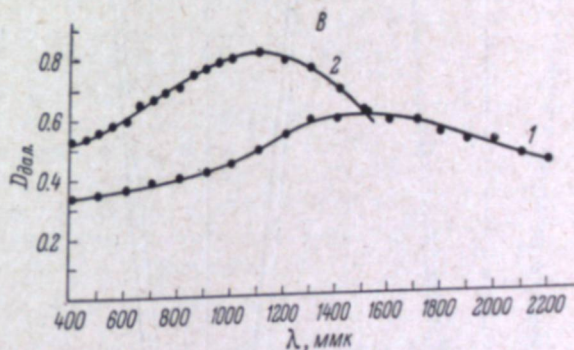
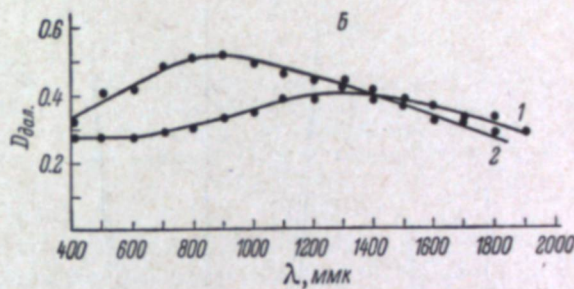
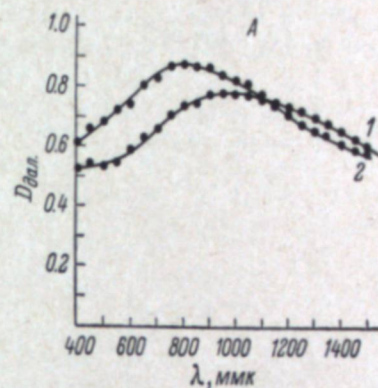
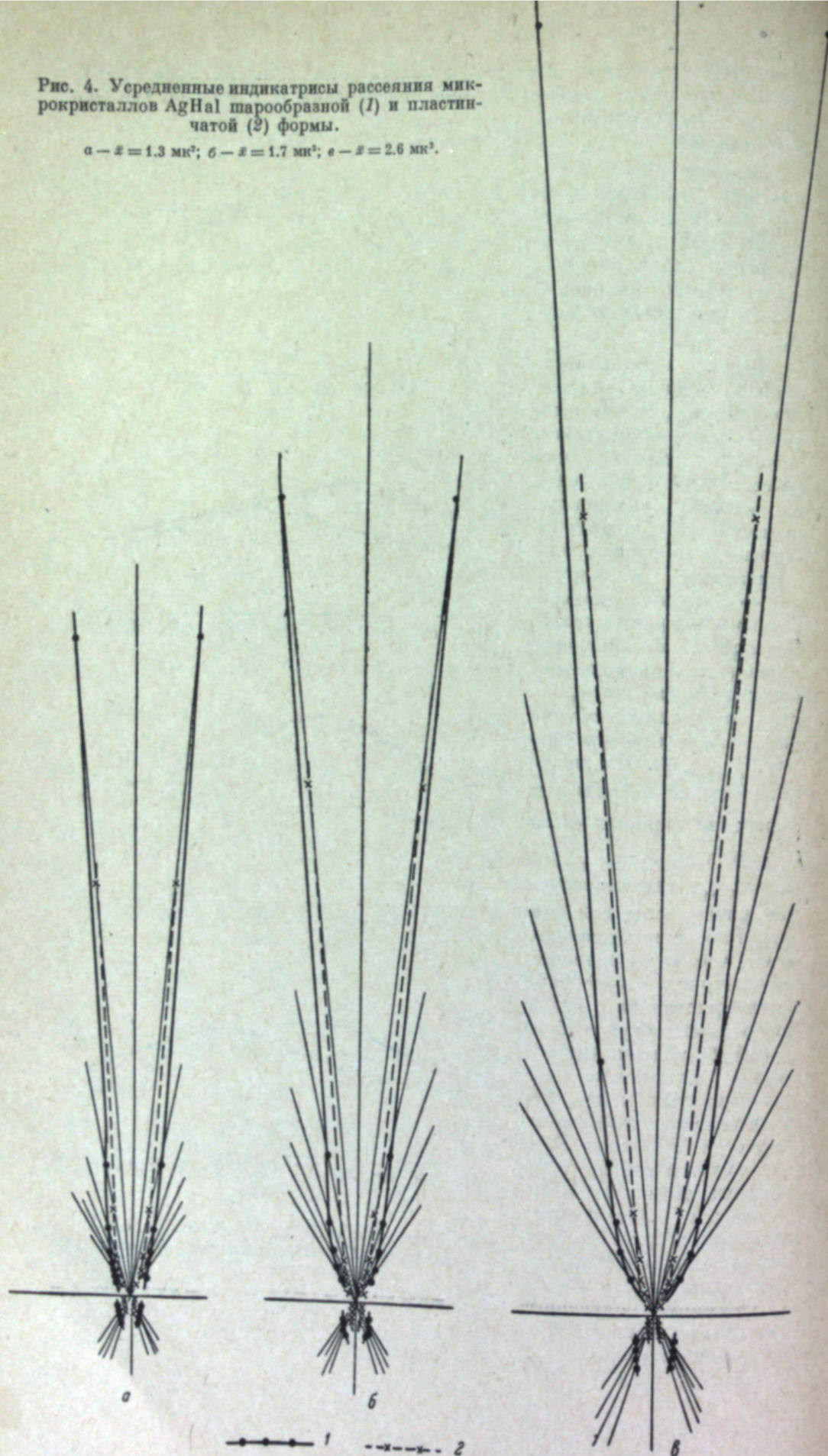


Рис. 3. Спектральный ход рассеяния слоев с шарообразными (1) и пластинчатыми (2) микрокристаллами AgHal.

А —  $\bar{x} = 0.94$  мкм<sup>2</sup>; Б —  $\bar{x} = 1.3$  мкм<sup>2</sup>; В —  $\bar{x} = 1.7$  мкм<sup>2</sup>; Г —  $\bar{x} = 2.6$  мкм<sup>2</sup>.

Рис. 4. Усредненные индикатрисы рассеяния микрокристаллов AgHal шарообразной (1) и пластинчатой (2) формы.

$a - \bar{x} = 1.3 \text{ мк}^2$ ;  $b - \bar{x} = 1.7 \text{ мк}^2$ ;  $c - \bar{x} = 2.6 \text{ мк}^2$ .



Тонкие пластинчатые микрокристаллы AgHal фотографических слоев по сравнению с шарообразными микрокристаллами равного сечения характеризуются меньшими коэффициентами рассеяния и спектральными кривыми рассеяния, смещенными в коротковолновую область спектра, т. е. пластинчатые микрокристаллы в отношении суммарного рассеяния ведут себя как более мелкие микрокристаллы шарообразной формы. В то же время пластинчатые микрокристаллы имеют более вытянутые в направлении первичного пучка индикатрисы рассеяния, чем микрокристаллы шарообразной формы.

Все эти данные показывают, что рассеяние света микрокристаллами AgHal фотографических слоев существенно изменяется в зависимости от их формы.

#### Влияние формы микрокристаллов AgHal на разрешающую способность фотографических слоев

Полученные данные о различиях в рассеянии света пластинчатыми и шарообразными кристаллами AgHal позволяют предполагать, что эмульсионные слои с пластинчатыми кристаллами в отношении разрешающей способности должны обладать преимуществами перед слоями с шарообразными кристаллами. Действительно, на это указывают как меньшие коэффициенты рассеяния, так и более вытянутые индикатрисы пластинчатых микрокристаллов AgHal.

Для проверки этого предположения описанные ранее фракционированные эмульсии безаммиачного типа, исходные безаммиачные эмульсии и эмульсии аммиачного типа поливались на подслое стекла для фотографических испытаний. Толщина слоев и концентрация AgHal сохранялись одинаковыми. Воздушно-сухие слои экспонировались в резольвометре ГОИ ФСР-5 [8, 9] для определения разрешающей способности. Проявлялись пластинки в стандартном проявителе № 1 в течение 6 мин.

Отметим, что поскольку резольвометр ФСР-5 снабжен объективом с апертурой 0.1, то получаемые на нем значения разрешающей способности высокодисперсных слоев оказываются несколько преуменьшенными. Однако сравнительные испытания ряда слоев [10] на указанном резольвометре и на резольвометре СР-13 [11], снабженном объективом с апертурой 0.3 и обеспечивающем получение максимальных значений разрешающей способности [12], показали, что характер наблюдаемых закономерностей сохраняется одинаковым.

На рис. 6 значения разрешающей способности для слоев фракций безаммиачных эмульсий (фр. Б) сопоставлены с разрешающей способностью слоев как аммиачных (А), так и безаммиачных (Б) нефракционированных эмульсий. При одинаковой средней площади проекции кристаллов AgHal из трех рассматриваемых типов слоев наибольшей разрешающей способностью обладают слои фракций безаммиачных эмульсий. Так как эти последние отличаются от аммиачных эмульсий только формой кристаллов (кривые распределения кристаллов по площади проекции у них совпадают), то очевидно, что их большая разрешающая способность связана с меньшим рассеянием света микрокристаллами пла-

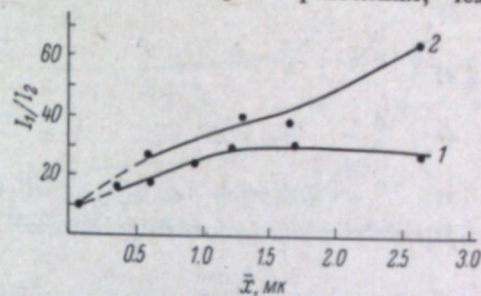


Рис. 5. Вытянутость усредненных индикатрис рассеяния микрокристаллов AgHal шарообразной (1) и пластинчатой (2) формы в зависимости от их средней площади проекции.

стинчатой формы. Эти опыты, следовательно, подтверждают преимущества в отношении разрешающей способности слоев с тонкими пластинчатыми кристаллами перед слоями с шарообразными кристаллами AgHal.

Самой низкой разрешающей способностью, как видно из рис. 9, характеризуются слои безаммиачных эмульсий. Это объясняется большим

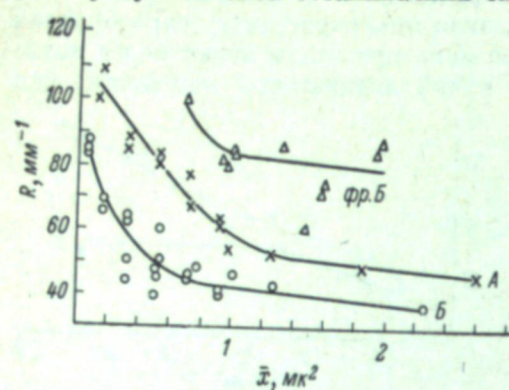


Рис. 6. Разрешающая способность слоев нефракционированных аммиачных (А), безаммиачных (Б) и фракционированных безаммиачных (фр. Б) эмульсий в зависимости от средних размеров микрокристаллов  $\bar{x}$ .

разнообразием кристаллов в этих эмульсиях по размерам, а следовательно, и по светочувствительности [3]; большая однородность кристаллов по размерам в аммиачных эмульсиях (несмотря на шарообразную их форму) обуславливает большую разрешающую способность слоев аммиачных эмульсий по сравнению со слоями безаммиачных эмульсий. Таким образом, только методом исключения влияния различий полидисперсности эмульсий оказалось возможным установить влияние формы микрокристаллов AgHal на разрешающую способность эмульсионных слоев.

#### Выводы

1. Исследовано влияние формы микрокристаллов галоидного серебра фотографических эмульсий на рассеяние ими света. Установлено, что тонкие кристаллы пластинчатой формы рассеивают свет меньше, чем равные им по площади проекции, но более толстые кристаллы шарообразной формы.
2. Исследовано влияние формы микрокристаллов галоидного серебра на разрешающую способность фотографических слоев. Показано, что при одинаковых кривых распределения микрокристаллов по их площади проекции фотографические слои с пластинчатыми микрокристаллами обладают большей разрешающей способностью, чем слои с шарообразными микрокристаллами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Р. Протас, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, Журн. прикл. химии, 22, 820, 1949.
2. П. В. Мейкляр, И. Р. Протас, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, Усп. научн. fotogr., 1, 60, 1951.
3. И. Р. Протас, З. И. Грацианская, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, П. Т. Сидоренкова, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 96, 1962.
4. И. И. Брейдо, П. Х. Прусс, Журн. техн. физ., 22, 515, 1952.
5. П. Х. Прусс, Журн. техн. физ., 24, 50, 1954.
6. П. Х. Прусс, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 4, 121, 1959.
7. Н. Э. Ритынь, В. П. Лазарев, Фактурометр. Описание прибора ИФТ-14, Л., 1942.
8. И. М. Давыдкин, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 4, 334, 1959.
9. ГОСТ 2819-45. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод резольвометрического испытания.
10. П. Х. Прусс. Рассеяние света в эмульсионных фотографических слоях и их разрешающая способность. Канд. дисс. Л., 1961.
11. А. Т. Ащеулов, Т. А. Павличук, М. Д. Хухрина, Усп. научн. fotogr., IV, 88, 1955.
12. В. А. Коридорф, И. А. Черный, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 454, 1961.

И. Б. БЛЮМБЕРГ, Л. И. ФЕДУК

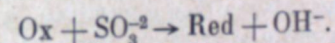
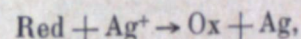
#### КИНЕТИКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ В ФОТОГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ И РЕЗКОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Если вещество А реагирует с веществом В и продукт этой реакции — вещество С — в свою очередь реагирует с веществом D, давая новый продукт Е, то такие две реакции называют последовательными [1]. Они схематически могут быть изображены так:

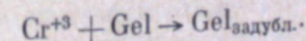
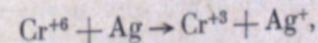


Во многих случаях кинетика второй из последовательных реакций определяет скорость первой. Если же в результате второй из последовательных реакций возникает фотографическое изображение, то можно показать, что его резкость определяется кинетикой этой реакции.

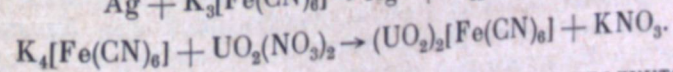
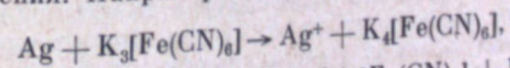
В фотографическом процессе последовательные реакции широко используются и часто играют важную роль. Так, например, вторичная реакция связывания окисленной формы проявляющего вещества сульфитом позволяет первичной реакции восстановления серебра идти с постоянной скоростью



В проявителях для цветных фотографических материалов связывание окисленной формы осуществляется краскообразующими компонентами. В дубящих проявителях оно осуществляется желатином. При дубящем отбеливании



В различных процессах усиления вторичные реакции приводят к возникновению веществ, увеличивающих оптическую плотность серебряного изображения. Например:



Д. А. Франк-Каменецкий [1] показал, что выход продуктов первичной и вторичной реакций в растворе определяется характером кинетической



тики вторичной реакции. Так, если кинетика вторичной реакции является диффузионной или близкой к ней, то выход продукта первичной реакции (вещество С) во много раз меньше выхода продукта вторичной реакции (вещество Е). Если же вторичная реакция проходит в кинетической области или близкой к ней, то выход продукта первичной реакции во много раз больше выхода продукта вторичной.

Франк-Каменецкий дает следующее соотношение:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{k_2}{\beta_C},$$

где  $q_1$ ,  $q_2$  — выходы первичной и вторичной реакций;  $k_2$  — константа скорости вторичной реакции;  $\beta_C$  — константа скорости диффузии продукта первичной реакции.

Это соотношение указывает возможные пути поддержания скорости первичной реакции в определенных пределах, что необходимо, в частности, при проявлении, когда продукты первичной реакции (окисление проявляющего вещества) тормозят ее или, наоборот, ускоряют.

Избежать влияния окисленной формы проявляющего вещества на скорость реакции восстановления серебра можно в том случае, если концентрация этой формы будет нулевой или очень малой. В принципе это может быть достигнуто двумя путями.

Диффузия окисленной формы от места возникновения протекает гораздо быстрее реакции образования этой формы. Так как объем раствора на много порядков больше реакционного объема, концентрация окисленной формы в реакционном объеме, так же как и во внешнем растворе, будет небольшой даже в том случае, если связывание окисленной формы протекает очень медленно. Следовательно, в рассматриваемом случае низкая концентрация окисленной формы в реакционном объеме будет достигнута и в том случае, когда вторичная реакция протекает в кинетической области. Однако, так как диффузия в жидкости и особенно в геле протекает очень медленно, этот путь может быть использован только при крайне медленно идущей первичной реакции.

Во всех практических случаях может быть использован другой путь. Он заключается в том, что окисленная форма очень быстро связывается в результате вторичной реакции с сульфитом, краскообразующей компонентой или желатином. Выше было указано, что диффузия окисленной формы в растворе и геле протекает очень медленно. Поэтому большая скорость вторичной реакции означает, что эта реакция проходит в диффузионной области. Следовательно, разбираемый случай характеризуется тем, что вторичная реакция протекает по диффузионной или близкой к ней кинетике.

Часто в результате вторичной реакции возникает нерастворимое вещество, из которого образуется изображение: в случае проявления цветных фотографических материалов это красочное изображение, в случае дубящего проявления — скрытое изображение из задубленного желатина, в случае усиления азотнокислым уранилом — изображение, состоящее из ферроцианида уранила.

Рассмотрим, как резкость контуров изображения, возникающего в результате вторичной реакции, (мы будем называть его в т о р и ч н ы м и з о б р а ж е н и е м) зависит от кинетики этой реакции.

Пусть вторичная реакция идет в кинетической или близкой к ней области. В этом случае вторичная реакция, в результате которой образуется вещество Е, протекает медленно, а диффузия вещества С, участвующего во вторичной реакции, — очень быстро. Следовательно, вещество С, возникшая в результате первичной реакции, не будет успевать

связываться в местах возникновения даже в том случае, если второй участник вторичной реакции — вещество D (сульфит, желатин, азотнокислый уранил) — находится в избытке по отношению к количеству образовавшегося вещества С. По мере возникновения С будет быстро диффундировать от мест своего возникновения, связываясь с D на больших расстояниях от этих мест. В этом случае вторичное изображение будет или очень размытым (нерезким) или, в предельном случае, вообще не будет существовать, так как Е возникнет в равном количестве во всех точках слоя, т. е. образует вуаль. Этот результат всегда будет иметь место, если кинетика вторичной реакции является химической или близкой к ней.

Рассмотрим противоположный случай.

Пусть вторичная реакция идет в диффузионной или близкой к ней области. В этом случае скорость вторичной реакции очень велика по сравнению со скоростью диффузии вещества С. Следовательно, по мере возникновения этого вещества оно в результате первичной реакции будет связываться там, где возникло, если вещество D находится в избытке. Это приведет к тому, что контуры изображения, возникающего в результате вторичной реакции, будут точно совпадать с контурами серебряного изображения, иначе говоря, резкость вторичного изображения не будет уступать резкости первичного (серебряного). Этот результат будет иметь место всегда, когда кинетика вторичной реакции является диффузионной, а вещество D присутствует в избытке по отношению к веществу С. Если же количества вещества D недостаточно для связывания всего образующегося вещества С, то, когда оно будет исчерпано в реакционном объеме, резкость вторичного изображения будет зависеть от соотношения скоростей диффузии веществ С и D. Если константы скорости диффузии таковы, что  $\beta_C \gg \beta_D$ , то вещество С будет уходить от места своего образования намного быстрее, чем вещество D будет приходить к этому месту. В таких условиях будет наблюдаться уменьшение резкости вторичного изображения. Если же  $\beta_D \gg \beta_C$ , то вещество D будет диффундировать к месту возникновения С гораздо быстрее, чем С — от этого места. Очевидно, что резкость вторичного изображения в этом случае уменьшается незначительно.

Эти общие положения легли в основу описываемых в статье экспериментов. Мы определяли наибольшую частоту штрихов, которую разрешало серебряное (первичное) изображение  $R_1$ , и сравнивали его с наибольшей частотой, разрешаемой во вторичном изображении  $R_2$ . Вещество D в наших опытах всегда присутствовало в избытке по отношению к образуемому веществу С. Если  $R_2 \cong R_1$ , то мы делали вывод, что вторичная реакция протекает по диффузионной или близкой к ней кинетике. Если же наблюдалось, что  $R_1 \gg R_2$ , то мы делали вывод, что вторичная реакция протекала по химической или близкой к ней кинетике.

В качестве первичного изображения всегда использовались серебряные изображения резольвометрических миш. Вторичные изображения состояли из задубленного желатина, полученного дубящим отбеливателем серебра в растворе с бихроматом калия или ванием серебра в растворе с бихроматом калия, возникающих в цветной дубящим проявлением, а также из красителей, возникающих в цветной многослойной пленке.

В одной группе опытов на матричной пленке М-2 с помощью резольвометра СР-17 получались резольвограммы, которые затем подвергались обработке дубящим отбеливателем, содержащим 2.5 г  $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  и 5.6 г NaCl в 1 л раствора. рН отбеливателя менялся от 1.0 до 5.8 путем введения в него различных количеств серной кислоты. Дальнейшая обработка пленок проводилась в соответствии с промышленным методом получения матриц. Полученные матрицы с изображениями резольвограмм

окрашивались в пурпурный цвет 2%-м раствором красителя Прямого розового светопрочного, после чего измерялись значения  $R_2$ . Эти значения сравнивались с соответствующими значениями  $R_1$  серебряного изображения до отбеливания.

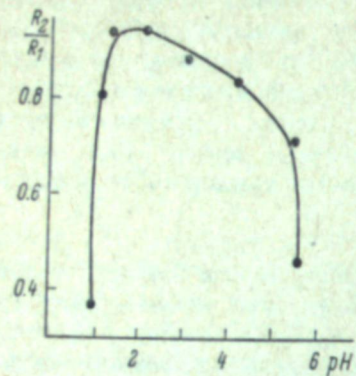


Рис. 1. Зависимость  $\frac{R_2}{R_1}$  от pH отбеливающего раствора. Каждая точка — среднее из 4 опытов.

На рис. 1 приведена кривая зависимости отношения  $\frac{R_2}{R_1}$  от pH отбеливающего

раствора, показывающая, что  $\frac{R_2}{R_1}$  близко к единице в области  $pH = 1.5 \div 2.5$ , но быстро падает за ее пределами. Это позволяет сделать вывод, что уменьшение резкости вторичного изображения по отношению к резкости первичного в условиях избытка вещества D (желатина) имело место потому, что кинетика вторичной реакции задубливания желатина смещалась в кинетическую область.

В обеих областях pH это, вероятно, обусловливалось замедлением реакции между основными солями хрома и желатином. Из данных ряда авторов [2, рис. 97] можно заключить, что реакция идет с наибольшей скоростью при основности хромовых солей, отвечающей  $pH \approx 3.0$ , и быстро замедляется с увеличением и уменьшением их основности.

В другой группе опытов резольвограммы обрабатывались в дубящем проявителе, содержащем в 1 л 5 г пирогаллола, 2 г безводного сульфата натрия, 1 г бромистого калия и 0.5 мл  $H_2SO_4$  (уд. вес 1.84). Значения pH проявителя были равны 7.5, 9.2, 10.5 и 13.0, что достигалось введением различных количеств соды и едкой щелочи. Последующая обработка пленок осуществлялась в соответствии с принятым в производстве методом обработки матриц, полученных дубящим проявлением. Готовые матрицы окрашивались, измерялись значения  $R_2$ , которые и сопоставлялись с соответствующими значениями  $R_1$ .

Кривая зависимости отношения  $\frac{R_2}{R_1}$  от pH дубящего проявителя (рис. 2) показывает, что реакция дубливания желатина окисленной формой пирогаллола протекает в диффузионной области при  $pH = 13.0$ , начинает приближаться к химической при уменьшении значений pH и близка к химической при  $pH \approx 9.0$ .

Так как скорость диффузии окисленной формы, вероятно, не зависит от pH, то изменение характера кинетики определяется скоростью реакции дубливания. Она имеет наибольшее значение при  $pH = 13.0$  и уменьшается при более низких значениях pH.

Изучалась, наконец, кинетика реакций краскообразования при проявлении цветной многослойной пленки. В качестве фотографического материала использовалась основа с нанесенным на нее одним из слоев

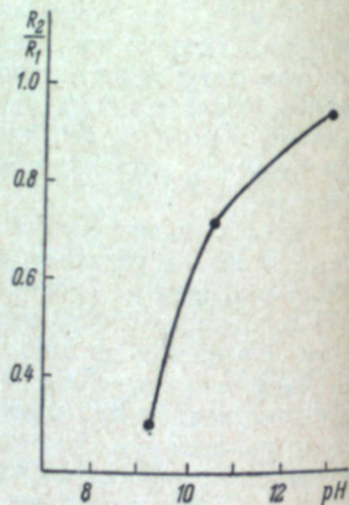


Рис. 2. Зависимость  $\frac{R_2}{R_1}$  от pH дубящего проявителя. Каждая точка — среднее из 4 опытов.

многослойной цветной позитивной пленки, содержащим краскообразующую компоненту. Использовались три материала с тремя различными слоями цветной многослойной пленки. Проявление производилось в проявителе следующего состава: диэтилпарафенилендиамина — 2.75 г/л, сульфата натрия (безводного) — 2 г/л, солянокислого гидроксиламина — 2 г/л, бромистого калия — 2.5 г/л. Использовались проявители со значениями pH 9.9, 13.1 и 13.4. В первом проявление заканчивалось за 7 мин., во втором — за 2.5 мин. и в третьем — за 50 сек.

Из части проявленных однокрасочных изображений резольвометрической миры удалялось серебро. В другой части обесцвечивался краситель. Значения разрешаемой частоты в серебряном и красочном изображениях сопоставлялись согласно ранее изложенному.

Значения  $\frac{R_2}{R_1}$  для трех красителей при различных значениях pH проявляющего раствора приведены в таблице.

Отсюда следует, что при использованных значениях pH реакции краскообразования всех трех красителей протекают в отчетливо диффузионной области.

#### Выводы

1. Рассмотрен вопрос о кинетике последовательных реакций. Показано, что во многих случаях кинетика вторичной реакции определяет течение первичной.
2. Если в результате последовательных реакций возникает фотографическое изображение, то его резкость зависит от кинетики вторичной реакции.
3. Исследована кинетика задубливания желатина окисленной формой пирогаллола и солями трехвалентного хрома, а также образования красителей в слоях многослойной пленки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Изд. АН СССР, М.—Л., 1947.
2. Х. Т. С. Бриттон. Водородные ионы. Госхимиздат, Л., 1936.

Ю. Н. ГОРОХОВСКИЙ, П. Х. ПРУСС

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ И МАКРОЗЕРНИСТОСТЬЮ ЧЕРНО-БЕЛЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ \*

Вопрос о том, в какой связи находятся разрешающая способность фотографического материала и его макрозернистость, излагается в литературе в весьма неясной форме. Поэтому представлялось небесполезным составить сводку имеющихся в нашем распоряжении данных такого рода.

Разрешающая способность определялась в соответствии с ГОСТом 2819—45 [1] с помощью проекционного резольвометра ФСР-5, снабженного объективом с апертурой 0.1, и миры абсолютного контраста, а для части материалов также в резольвометре СР-13 [2], имеющем объектив с апертурой 0.3. Определение макрозернистости производилось с помощью проекционного гранулометра УКП-5 [3] по методике, разработанной одним из авторов совместно с Т. М. Левенберг [4]. Для устранения влияния микроструктуры клина сенситометра при гранулометрических испытаниях все материалы экспонировались в дисковом сенситометре по шкале времени. Гранулограммы для всех материалов получены на одной фотографической бумаге Унибром (нормальная № 3) при постоянных условиях обработки.

В табл. 1 приведены в систематизированной форме ранее опубликованные [5] данные о разрешающей способности  $R$  при  $A=0.1$  и факторе зернистости  $G$  35 отечественных черно-белых фотографических материалов, расположенных в порядке убывания разрешающей способности, при проявлении до достижения  $\tau_{рек}$  согласно ГОСТу 2817—50.

Известно, что результаты резольвометрических измерений зависят от апертуры объектива резольвометра. Оптимальные значения разрешающей способности получаются [2, 6] при измерениях с  $A \cong 0.3$ . На рис. 1 для части изучавшихся нами фотографических материалов сопоставлены значения  $R$ , полученные на резольвометре СР-13 при  $A=0.3$ , и значения  $R$ , полученные на резольвометре ФСР-5.

Из рис. 1 видно, что для фотографических материалов, разрешающих до  $55 \text{ мм}^{-1}$ , оба прибора дают совпадающие значения  $R$ , а чем выше разрешающая способность материала, тем более преуменьшены числа  $R$ , полученные на приборе ФСР-5. Приблизительно связь между теми и другими числами разрешающей способности выражается прямой, показанной на рисунке. Пользуясь этой прямой, мы приблизительно определили из чисел  $R$  табл. 1 оптимальные значения разрешающей способности всех испытанных фотографических материалов, которые и сопоставили со значениями фактора зернистости  $G$  (рис. 2).

\* Доложено на симпозиуме по структурным свойствам фотографических материалов и их информационной способности, состоявшемся в Казани 30 сентября 1963 г.

Таблица 1  
Разрешающая способность при  $A=0.1$  и фактор зернистости ряда фотографических материалов

Фотографические материалы	$R, \text{мм}^{-1}$	$G$	
Фототехническая пленка ФТ-30 . . . . .	100	11	
Кинопозитив МЗ . . . . .	95	7	
Диапозитивные пластинки . . . . .		12	
Пластинки спектральные . . . . .		11	
Кинонегатив МЗ . . . . .	90	5	
Дубль-негатив А . . . . .	85	5	
Фототехническая пленка ФТ-31 . . . . .		12	
Фонограммная пленка ЗТ-6 . . . . .	80	12	
Дубль-позитив А . . . . .		8	
Кинонегатив Б . . . . .	75	14	
Кинопозитив нитро . . . . .		16	
Фонограммная пленка ЗТ-4 . . . . .		11	
Панхром нормальная, 35-мм . . . . .		20	
Плоская пленка Панхром контрастная . . . . .		25	
Пластинки спектральные II . . . . .		18	
Пластинки спектральные III . . . . .		16	
Пластинки Микро . . . . .		16	
Кинонегатив А . . . . .		16	
Кинонегатив ВП . . . . .		16	
Кинонегатив Д . . . . .	20		
Изохром нормальная, 60-мм . . . . .	65	20	
Пленка РФ-1, 120-мм . . . . .		20	
Пленка РФ-3, 120-мм . . . . .		20	
Фототехническая пленка ФТ-10 . . . . .		20	
Пластинки несенсибилизированные . . . . .		20	
Пластинки Инфрахром 760 . . . . .		22	
Изопанхром нормальная, 35-мм . . . . .		60	22
Изопанхром нормальная, 60-мм . . . . .			18
Панхром Х, 190-мм . . . . .			20
Плоская пленка Панхром нормальная . . . . .			16
Плоская пленка Изопанхром нормальная . . . . .	55	16	
Пластинки Инфрахром 880 . . . . .		22	
Пластинки Изоорто . . . . .	50	22	
Пластинки Панхром . . . . .		28	
Пластинки Инфрахром 840 . . . . .		28	
	45	22	

Как видно из рис. 2, в целом наблюдается тенденция к уменьшению фактора зернистости фотографических материалов по мере увеличения их разрешающей способности. Однако в то же самое время видно, что существуют фотографические материалы, разрешающая способность которых одинакова, а фактор зернистости различается более чем в 2 раза. С другой стороны, существуют также и такие материалы, которые при одинаковом значении фактора зернистости имеют сильно различающиеся значения разрешающей способности.

Сопоставление разрешающей способности и зернистости фотографических материалов было сделано ранее [4]. Хотя в той статье сопоставление произведено для меньшего количества и менее разнообразных материалов и, кроме того, значения разрешающей способности этих материалов являлись приуменьшенными, обнаружилась такая же обратная тенденция, как и при нашем сопоставлении.

Эти данные свидетельствуют, что разрешающая способность эмульсионных слоев и макрозернистость проявленных фотографических матери-

алов не находятся в какой-то определенной связи. Было бы неправильно говорить о зависимости зернистости фотографических материалов от их разрешающей способности или наоборот. Обе эти характеристики фотографических материалов определяются свойствами эмульсионных слоев

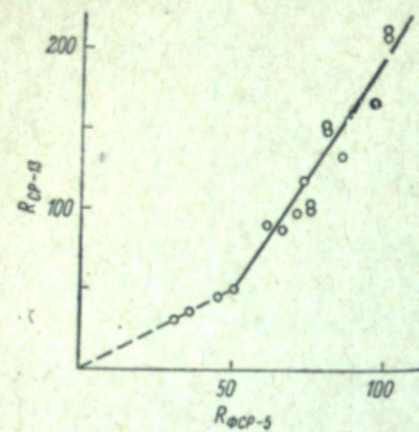


Рис. 1. Сопоставление значений  $R$  фотографических слоев, измеренных на резольвометре CP-13 и резольвометре FCP-5.

и при одинаковой обработке имеют различные оптические плотности почернения, чем и обусловлено явление макрозернистости.

Значительные отступления от этой общей тенденции вызваны другими различиями в эмульсионных слоях фотографических материалов: различием в концентрации галоидного серебра в слое или в соотношении  $\frac{c_{AgHal}}{c_{жел}}$ , различием в пространственном распределении кристаллов в слое, а также в распределении их по чувствительности и др.

Одним из авторов было установлено [8], что разрешающая способность фотографического слоя значительно повышается, если полив эмульсии на подложку производить в условиях, при которых происходит оседание эмульсионных кристаллов и в нижней части эмульсионного слоя образуется тонкий слой с большой концентрацией кристаллов. При этом обращало на себя внимание, особенно в случае низкодисперсных эмульсий, что изображение штрихов мира оказывалось не сплошным, а состоящим из отдельных, хорошо видимых в микроскоп крупинок. Это указывало на то, что условия полива влияют не только на разрешающую способность слоя, но, по-видимому, и на его зернистую структуру.

По-видимому, общую тенденцию, отмеченную нами, определяет степень дисперсности галоидного серебра в эмульсии фотографических материалов: по мере увеличения средних размеров эмульсионных кристаллов фотографического материала уменьшается разрешающая способность и возрастает зернистость в проявленном изображении.

Действительно, с увеличением размеров эмульсионных кристаллов увеличивается, как следует из [7], неравномерность распределения их в слое: одинаковые элементарные площадки содержат все более различающиеся количества кристаллов. Вследствие этого две соседние малые площадки фотографического слоя в результате действия одинакового количества освеще-

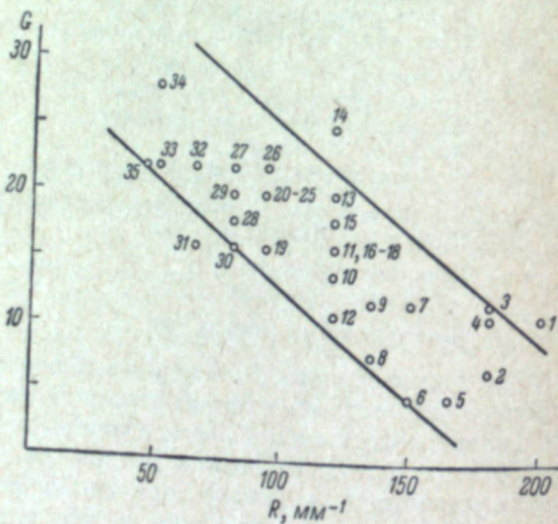


Рис. 2. Сопоставление фактора зернистости и разрешающей способности ряда фотографических слоев (цифры у точек соответствуют порядковым номерам фотографических слоев в табл. 1).

С целью выяснения этого мы поставили соответствующие опыты. Две эмульсии, полученные нами на Ленинградской фабрике фотобумаг, — Унибром (нормальная) и осциллографная — поливались на пластинки  $3 \times 12 \text{ см}^2$  как в условиях, при которых имело место оседание эмульсионных кристаллов, так и в обычных условиях, когда такого оседания не было. Первое условие достигалось разбавлением эмульсии перед поливом водой и осуществлением полива на подогретом поливном столике. Второе условие достигалось быстрым студением слоя, для чего в эмульсии создавалась достаточно большая концентрация желатина и пластинка с растекшимся по ней слоем эмульсии помещалась на холодный поливной столик. Эмульсия, разбавленная водой перед поливом, наносилась в таком количестве, чтобы сохранить поверхностную концентрацию галоидного серебра в готовом слое постоянной. Высушенные готовые слои подвергались резольвометрическому и гранулометрическому испытаниям.

В табл. 2 представлены значения разрешающей способности и фактора зернистости полученных таким образом слоев.

Таблица 2

Зависимость разрешающей способности и фактора зернистости от условий полива эмульсии

Условия полива		Осциллографная эмульсия		Унибром	
степень разбавления водой	количество поливаемой эмульсии, мл	$R, \text{мм}^{-1}$	$G$	$R, \text{мм}^{-1}$	$G$
Не разбавлено.	1	60	10	105	5.5
1:2	2	95	20	115	10
1:4	4	95	28	—	—

Как видно из табл. 2, и разрешающая способность, и фактор зернистости возрастают при поливе разбавленной эмульсии и протекающем при этом оседании кристаллов галоидного серебра в слое, в чем мы убедились, рассматривая полученные слои в микроскоп.

При рассматривании обычных фотографических слоев последовательной перефокусировкой микроскопа можно обнаружить большое количество рядов кристаллов, расположенных друг над другом. В слоях же с осевшими эмульсионными кристаллами почти все кристаллы фокусируются одновременно, что указывает на то, что все они лежат почти в одной плоскости.

В случае более или менее равномерного объемного распределения кристаллов в слое макрозернистость оказывается меньшей, чем при оседании, когда эмульсионные кристаллы располагаются почти в одной плоскости. Объяснение этого, как нам представляется, как указано, имеет большое значение. В слое нормальной неразбавленной эмульсии, как указано, имеется большое количество расположенных друг над другом рядов кристаллов. Поэтому различие в количестве кристаллов на элементарных площадках одного из этих рядов может компенсироваться обратным различием в другом ряду. В слое же, в котором все кристаллы концентрируются почти в одной плоскости, различия в числе кристаллов на соседних элементарных площадках остаются некомпенсированными и ведут к большей макрозернистости. Очевидно, что для уменьшения зернистости в таких слоях кристаллы галоидного серебра должны распределяться с большей равномерностью по площади слоя, чем в обычных слоях.

В то же время увеличение концентрации кристаллов галоидного серебра, приводящее к увеличению показателей ослабления света в слое, ограничивает распространение рассеянного света в эмульсионном слое и тем самым увеличивает разрешающую способность. Повышенная разрешающая способность седиментированных эмульсионных слоев обусловлена также, по-видимому, тем, что эти слои значительно прозрачнее [8, 9] обычных эмульсионных слоев вследствие сильной вытянутости их индикатрис рассеяния в направлении распространения падающего света.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 2819—45. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод резольвометрического испытания.
2. А. Т. Ащеулов, Т. А. Павличук, М. Д. Хухрина, Усп. научн. fotogr., IV, 88, 1955.
3. Ю. Н. Гороховский, Б. М. Левин, Усп. научн. fotogr., IV, 117, 1955.
4. Ю. Н. Гороховский, Т. М. Левенберг, Усп. научн. fotogr., I, 86, 1951.
5. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Сенситометрический справочник. ГТТИ, М., 1955.
6. В. А. Коридорф, И. А. Черный, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, 454, 1961.
7. A. Houtot, Sci Ind. Phot., 18, 359, 1947.
8. П. Х. Прусс. Рассеяние света в эмульсионных фотографических слоях и их разрешающая способность. Канд. дисс. Л., 138, 1961.
9. W. Marcowski, Sci Ind. Phot., 26, 87, 1955.

А. Л. КАРТУЖАНСКИЙ, Б. П. СОЛТИЦКИЙ

### РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СЛОЕВ, ЭКСПОНИРУЕМЫХ ЯДЕРНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

#### Введение

В практике радиоавтографии, особенно применительно к биологическим объектам, часто возникает задача разрешения соседних микроскопических элементов структуры (например, клеток), участвующих в накоплении радиоактивного вещества и образующих на радиоавтографе соседние участки почернения. Эта задача принципиально настолько близка к некоторым задачам обычной фотографии, что, казалось бы, сразу определяется и метод для выбора фотографических слоев и условий их экспонирования и обработки. Требуется иметь тест-объект, разумеется радиоактивный, с периодической структурой или набором таких структур (различающихся пространственными частотами) и с его помощью осуществить испытание, по существу вполне тождественное обычному резольвометрическому. Если, однако, обратиться к литературе, в частности биологической, то можно с удивлением отметить, что именно этот метод остался почти неизвестным многим авторам, пользовавшимся радиоавтографической методикой.

Так, Бойд [1], представивший наиболее полную сводку результатов по всем аспектам биологической радиоавтографии, в том числе и по разрешающей ее способности, начинает рассмотрение этого вопроса с разрешения одиночного объекта, т. е. с полуширины его размытого изображения, а затем уже переходит к разрешению двух объектов. Так как полуширина одиночного размытого изображения поддается теоретическому расчету, в общем согласующемуся с опытом, то подобный же расчет проводится и для двух объектов и принимается с доверием. Именно поэтому можно встретить у Бойда утверждение о способности фотографического слоя 20-микронной толщины разрешить два объекта на расстоянии 0.8 мк (разрешающая способность  $1250 \text{ мм}^{-1}$ ); как будет видно из дальнейшего, впрочем, никакого сравнения с опытом такое утверждение не выдерживает. Впрочем, и полуширина одиночного изображения на опыте также существенно отличается от расчетной, если для сравнения со значениями, приводимыми Бойдом, взять, например, данные М. С. Егоровой и К. С. Богомолова [2]. С помощью методов, близких к оптической резольвометрии, разрешающая способность при экспонировании ядерными излучениями изучалась по существу только в работе Стивенса [3]. Он обработал радиоактивным йодом серебряное фотографическое микроизображение штриховой миры и созданную таким путем радиоактивную миру использовал для получения

контактных резольвограмм на испытуемых слоях. Хотя Стивенсу удалось получить вполне удовлетворительные резольвограммы и с их помощью изучить влияние некоторых факторов на разрешающую способность, его работа имела и ряд недостатков, из которых укажем на два, на наш взгляд важнейших.

Во-первых, при йодировании миры (как показала наша собственная практика) часто происходит связывание заметных количеств радиоактивного йода желатином между штрихами, что искажает распределение экспозиций при последующем экспонировании и снижает контраст изображения. Во-вторых, поскольку разрешающая способность зависит от типа и энергии излучения, желательнее иметь миры с разнообразными радиоактивными излучателями, а не только с йодом; между тем выбор химических элементов, соединения которых пригодны для реакций с серебряным изображением, а сами элементы имеют удобные для работы радиоизотопы, очень ограничен.

Тем не менее методика Стивенса и его результаты представляют собой, по нашему мнению, важный и по существу первый шаг в области резольвометрии ядерных излучений. Разрешающая способность различных исследованных им материалов лежала в пределах от 95 (фототехническая эмульсия) до  $250 \text{ мм}^{-1}$  (липпмановская эмульсия) при толщине слоя 3—4 мк, что внушает гораздо больше доверия, чем данные, сообщаемые Бойдом.

В последнее время появился еще один сходный метод резольвометрии. При работах с узкими фокусированными пучками частиц штриховую резольвограмму удалось получить [4] путем построчной развертки пучка с закономерным изменением расстояния между строками. Таким способом, в частности, были испытаны некоторые фотографические материалы, применяемые в электронной микроскопии и электронографии, причем их разрешающая способность оказалась в пределах от 155 до  $275 \text{ мм}^{-1}$ . Предел разрешения этого метода обуславливает наряду со свойствами фотографического слоя также сечение пучка, диаметр которого (несколько микронов) может оказаться больше разрешаемого расстояния между строками. Следует заметить, что практически подобные пучки осуществимы только для электронов ( $\beta$ -частиц), и притом в ограниченном интервале энергий; к действию  $\gamma$ -излучения данная методика вообще не относится. Таким образом, и в данном случае также отсутствует универсальность, которая позволила бы сделать описываемую методику стандартной процедурой ядерной резольвометрии.

Как нам представляется, необходимая универсальность достигнута (по крайней мере в принципе) в тест-объекте, описанном в предыдущем нашем сообщении [5]. Он состоит из стопки чередующихся листов бумаги, пропитанных и не пропитанных радиоактивным раствором; при экспонировании стопка накладывается на фотографический слой своим торцом. Выбор растворов, а значит и излучателей, для пропитки стопки очень велик; что особенно важно, всегда можно провести испытание разрешающей способности по отношению к тому же излучателю, который используется в основном опыте для получения радиоавтографа.

Ниже мы излагаем результаты опытов с указанными тест-объектами, причем варьировались не только источники ядерного излучения, но и эмульсионные слои (тип эмульсии, толщина слоя, концентрация AgHal в нем) и условия их экспонирования и обработки. Последнее было принято потому, что в литературе закономерности изменения разрешающей способности за счет различных факторов (применительно к ядерному излучению) изучены недостаточно и несистематически, а для некоторых факторов и вообще неизвестны.

Использовались два  $\alpha$ -излучателя:  $\text{U}^{238}$  (энергия частиц 4.2 Мэв) в виде уранил-нитрата и  $\text{Po}^{210}$  (5.3 Мэв) в виде  $\text{Po}(\text{NO}_3)_2$  и три  $\beta$ -излучателя:  $\text{S}^{35}$  (максимальная энергия  $\beta$ -спектра 0.167 Мэв) в виде  $\text{NaHSO}_4$ ,  $\text{Ca}^{45}$  (0.255 Мэв) в виде  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Sr}^{89}$  (1.57 Мэв) в виде  $\text{SrCl}_2$ .

Как известно, с ростом энергии частиц возрастает их пробег в эмульсии, а следовательно, и расстояние от границы «штрихов» (торцов бумажных листов), на котором они могут вызвать образование почернения. Таким образом, появляется определенная зависимость разрешающей способности  $R$  от энергии частиц, исследование которой имеет первостепенное значение для ядерной резольвометрии. Зависимость существует также и от типа частиц, поскольку характер  $\alpha$ -следов (прямые, расходящиеся веером) совсем иной, чем  $\beta$ -следов (запутанные кривые, хорды которых часто в несколько раз короче самих следов). Этим в значительной мере и определяется выбор излучателей в нашей работе, хотя известную роль сыграли и иные соображения, в частности достаточно большой период полураспада.

Что же касается  $\gamma$ -излучателей, то при их выборе встретились трудности, пока не преодоленные. Применение смешанных  $\beta + \gamma$ -излучателей недопустимо, поскольку в прямом контакте с фотослоем  $\beta$ -излучение обычно обладает большим действием, чем  $\gamma$ -излучение, и закономерности последнего остаются невыявленными; это относится, в частности, к таким распространенным излучателям, как  $\text{Co}^{60}$  и  $\text{J}^{131}$ . Попытки отфильтровать  $\beta$ -излучение слоем поглощающего вещества ни к чему не приводят, так как нарушение контакта фотографического слоя с излучателем резко понижает  $R$ , что отмечал и Стивенс [3]. Что касается чистых  $\gamma$ -излучателей, то, не говоря уже об их редкости, среди них не оказалось подходящих по периоду полураспада, наличию хорошо растворимых соединений и другим признакам.

Для приготовления тест-объектов использовались растворы такой активности, чтобы, с одной стороны, не прибегать к слишком длительному экспонированию и, с другой стороны, избежать активностей, требующих специальных мер предосторожности. Наилучшими оказались активности  $\sim 10$  мккюри/см<sup>2</sup>; как будет видно из дальнейшего, времена экспонирования имели при этом величину порядка часов или суток. Существенно, что удалось получить приблизительно равные времена экспонирования для разных излучателей.

Наши тест-объекты, как уже говорилось [5], состоят из 12 сортов бумаги, различающихся по толщине (от 100 до 4 мк). Соответственно имеется 12 разных групп штрихов и соответствующих им пространственных частот, а именно 5, 8.3, 11.9, 16.7, 20, 25, 33.3, 50, 62.5, 83, 100,  $125 \text{ мм}^{-1}$ . Эта прогрессия не является ни арифметической, ни геометрической: знаменатель ее меняется в пределах от 1.2 до 1.5, а в одном случае даже до 1.67 и в общем слишком велик. Однако следует помнить, что частоты определяются существующими толщинами бумаги и не могут быть сделаны иными, по крайней мере в области больших частот.

При изготовлении и сборке тест-объектов особое внимание было обращено на устранение возможностей радиоактивного загрязнения неактивных листов, что привело бы к появлению на резольвограмме почернений в промежутках между «штрихами» и снижению контраста изображения. Таких возможностей было две: перенос активности на острие ножа при обрезке рабочего края листов и диффузия активных веществ в готовом тест-объекте под действием давления зажимного приспособления. Соответственно были приняты следующие меры предосторожности. Во первых, стопки активных и неактивных листов бумаги обрезались раздельно

Разрешающая способность 4 фотографических слоев при разных временах экспонирования

Материал	$t_{э.}$ , час.	$R$ (мм <sup>-1</sup> ) при экспонировании источником				
		Po <sup>210</sup>	U <sup>238</sup>	Sr <sup>90</sup>	Ca <sup>45</sup>	S <sup>35</sup>
Электроннографические пластинки, тип 3.	1	16.7	—	25	25	33.3
	2	16.7	20	33.3	33.3	50
	3	20.0	25	33.3	50	50
	4	16.7	25	25	33.3	50
	6	16.7	25	20	25	33.3
	12	11.9	25	16.7	20	25
	18	11.9	33.3	11.9	16.7	20
	24	8.3	33.3	11.9	11.9	20
	36	5	25	8.3	8.3	16.7
	Рентгеновская пленка, тип X.	1	8.3	—	8.3	11.9
2		8.3	—	11.9	16.7	20
3		11.9	16.7	11.9	20	25
4		11.9	16.7	16.7	25	25
6		16.7	20	20	25	33.3
9		11.9	20	16.7	20	25
12		11.9	20	11.9	16.7	20
18		8.3	25	11.9	11.9	16.7
24		5.0	20	8.3	8.3	11.9
36		—	16.7	8.3	8.3	11.9
Диапозитивные пластинки.	2	—	—	—	—	20
	3	11.9	—	16.7	20	25
	4	11.9	16.7	20	25	33.3
	6	16.7	20	25	25	50
	9	20	20	25	33.3	50
	12	20	25	33.3	33.3	50
	18	20	25	50	50	62.5
	24	25	33.3	50	62.5	83
	36	16.7	25	25	50	62.5
	Пленка Микрат-200.	3	16.7	—	20	25
4		20	25	25	33.3	50
6		25	33.3	33.3	50	62.5
9		33.3	50	50	62.5	83
12		50	62.5	62.5	83	100
18		62.5	83	83	100	125
24		62.5	83	83	125	125
36		50	62.5	62.5	83	100

и разными ножами. Этим, правда, мы осложнили последующую сборку тест-объекта, так как достичь совпадения краев при чередовании листов из разных стопок удалось только с помощью пробивки специальной перфорации и последующей сборки всей стопки на перфорационных стержнях. Во-вторых, до сборки листки определенным образом длительно высушивались и в дальнейшем сохранялись такими; только тогда диффузия не играла существенной роли. Однако в связи с этим экспонирование приходилось вести в затемненном эксикаторе над CaCl<sub>2</sub> для сохранения необходимого низкого уровня влажности в течение всего опыта.

Для экспонирования тест-объект накладывался на испытуемый слой сверху, и контакт между ними создавался действием веса тест-объекта. Контакт был во всех случаях достаточно хорошим: как показал специальный опыт, дополнительный груз на тест-объекте не влиял на  $R$ , а значит и на надежность контакта. В этом опыте выявилась также надежность сборки тест-объекта — все активные и неактивные листки касались поверхности фотографического слоя одновременно. О качестве получавшихся резольвограмм можно судить, например, по приведенному нами ранее [5] микрофотоснимку одной из таких резольвограмм.

В нашей работе разрешающая способность исследовалась для различных материалов: пластинок электроннографических (тип 3) и диапозитивных, пленок рентгеновской (тип X) и Микрат-200 и слоев ядерной эмульсии типа Р, различавшихся по толщине и концентрации AgHal. У рентгеновской пленки во всех опытах слой эмульсии с одной стороны предварительно удалялся. Проявление резольвограмм во всех случаях производилось в проявителе ID-19, разбавленном втрое, при 20° С. Просмотр резольвограмм осуществлялся, как обычно, под микроскопом при увеличении 56\*.

### Результаты опытов и их обсуждение

Мы начали исследование разрешающей способности с выбора таких условий экспонирования и обработки слоев, при которых она максимальна.

В первую очередь была исследована зависимость  $R$  от экспозиции. Поскольку изменять экспозицию можно было только за счет времени экспонирования  $t_{э.}$ , мы представим полученные данные в виде зависимости  $R$  от  $t_{э.}$  При этом, однако, необходимо оговорить следующее. Хотя все использованные излучатели обладали сравнительно большим периодом полураспада (наименьший из них — 54.5 дня — у Sr<sup>90</sup>) и изменением их активности во время экспонирования можно пренебречь, после ряда опытов активность могла заметно уменьшиться и в случае повторения опытов требовалось соответственно увеличить  $t_{э.}$  для сохранения прежней экспозиции. Чтобы не усложнять представление результатов, мы пользуемся всюду не фактическими, а «приведенными» значениями  $t_{э.}$ , т. е. теми его значениями, которые соответствуют активностям тест-объектов в начале серии опытов.

В табл. 1 мы приводим зависимость  $R$  от  $t_{э.}$  для 4 материалов при постоянных условиях проявления (3 мин.).

Как можно видеть, оптимальное значение  $t_{э.}$  в общем одинаково для всех излучений, действующих на данный слой. Для различных же слоев оптимальные значения  $t_{э.}$  значительно различаются, будучи тем меньшими, чем чувствительность эмульсий выше. Последнее по существу означает, что наивысшая  $R$  достигается приблизительно при одной и той же плотности почернения, а различия  $t_{э.}$  суть различия экспонирования, необходимых для получения этой плотности. Микрофотометрирование резольвограмм показало, что оптимальная плотность действительно

всегда лежит в узких пределах от 0.3 до 0.4; эта плотность в общем ниже, чем в оптической резольвометрии.

В ходе изложенных опытов нам приходилось иметь дело с несколькими образцами одних и тех же материалов (рентгеновской пленки, электроннографических пластинок), значительно различавшимися по дате выпуска — от 2 месяцев до 3 лет. Хотя чувствительность их за длительный срок успевала измениться иногда в несколько раз, а вуаль заметно возрастала, величина  $R$  в оптимуме оставалась неизменной. Более того, не изменялась и оптическая плотность над вуалью, ей соответствующая, несмотря на то что  $t_{э.}$  для получения этой плотности возрастало в связи с падением чувствительности, а суммарная плотность штриха и вуали увеличивалась за счет последней. Следовательно,  $R$  определяется только структурными свойствами эмульсионного слоя, которые во времени остаются неизменными.

Продолжая исследование оптимальных условий получения резольвограмм, мы осуществили также ряд опытов по изменению времени проявления ( $t_{пр.}$ ) при постоянных условиях экспонирования (оптимальных

на основании табл. 1). Пример такого рода приводится в табл. 2 для диапозитивных пластинок, экспонированных всеми 5 тест-объектами в течение 24 часов.

Как можно видеть, оптимальное значение  $t_{пр.}$  одинаково для всех излучений; этот результат вполне закономерен, коль скоро все излучатели были подобраны в таких концентрациях, чтобы за равные времена  $t_0$  получить приблизительно равные плотности почернения. Табл. 2, показывает также, что  $t_{пр.}$  при получении данных, приведенных в табл. 1, было оптимальным. Благодаря этому указанные данные могут быть сразу же использованы для изучения наиболее интересующих нас зависимостей разрешающей способности от природы и энергии излучения.

Таблица 2

Разрешающая способность диапозитивных пластинок при разных  $t_{пр.}$

$t_{пр.}$ , мин.	$R$ (мм <sup>-1</sup> ) при экспонировании источником				
	Po <sup>210</sup>	U <sup>238</sup>	Sr <sup>90</sup>	Ca <sup>45</sup>	S <sup>35</sup>
1	16.7	20	25	33.3	50
2	20	25	33.3	50	62.5
2.5	25	33.3	50	62.5	83
3	25	33.3	50	62.5	83
4	25	33.3	50	62.5	83
5	20	25	33.3	50	62.5
6	20	25	25	33.3	50
7	16.7	20	25	25	33.3

Если сравнить по отдельности данные для  $\alpha$ -излучателей и  $\beta$ -излучателей, то уменьшение  $R$  с ростом энергии, а значит и пробега частиц, выявляется вполне отчетливо. Последнее вполне объяснимо, так как с ростом пробега число эмульсионных кристаллов, задеваемых частицами в области вне геометрических границ штриха, возрастает. Что же касается сравнения между собой  $R$  для  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучателей, то оно возможно лишь в самых общих чертах: даже при равных пробегах вклад  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц в размытие геометрических границ идеальной резольвограммы неодинаков, поскольку геометрия и плотность их следов совершенно различны. Рассмотрим это несколько подробнее.

Если  $\alpha$ -частица вылетела с края штриха в пространство между штрихами, то направление ее не может измениться и возникшие за ее счет проявленные зерна будут расположены только между штрихами. В аналогичных начальных условиях  $\beta$ -частица много раз претерпит рассеяние, в том числе и на большие углы, и может вернуться в границы исходного штриха, оставив между штрихами лишь малое число проявленных зерен. Кроме того, плотность  $\alpha$ -следов в сопоставимых условиях всегда значительно больше, чем  $\beta$ -следов, и даже если бы обе частицы прошли одинаковые пути вне границ штриха, вклад  $\alpha$ -частицы в общее число проявившихся зерен был бы гораздо более заметным. Все эти соображения, как показывает табл. 1, вполне подтверждаются получением отчетливо большей  $R$  при экспонировании любым  $\beta$ -излучателем, нежели это можно получить для  $\alpha$ -излучателей.

Из табл. 1 можно также видеть, что  $R$  закономерно возрастает с ростом дисперсности твердой фазы: по величине  $R$  все эмульсии во всех случаях расположились в порядке, обратном их расположению по среднему размеру микрочастиц.

Следующая серия опытов была посвящена выяснению зависимости разрешающей способности от толщины эмульсионного слоя и содержания в нем AgHal. Опыты проводились на слоях ядерной эмульсии типа Р лабораторного полива при различных разбавлениях исходной эмульсии желатином. Всего было осуществлено 4 варианта концентраций AgHal (85, 60, 45 и 30% по весу) и столько же вариантов толщины (10, 15, 25 и 35 мк).

Таблица 3

Разрешающая способность эмульсии типа Р при различных концентрациях AgHal (толщина слоя 15 мк)

Концентрация AgHal, %	$R$ (мм <sup>-1</sup> ) при экспонировании источником				
	Po <sup>210</sup>	U <sup>238</sup>	Sr <sup>90</sup>	Ca <sup>45</sup>	S <sup>35</sup>
30	33.3	33.3	50	62.5	83
45	33.3	33.3	50	62.5	83
60	33.3	50	62.5	83	100
85	50	50	62.5	83	100

На рис. 1 и 2 показана зависимость  $R$  от толщины слоя при двух крайних значениях концентрации AgHal, а в табл. 3 — зависимость ее от концентрации AgHal при постоянной толщине слоя.

Как можно видеть, общие закономерности здесь те же, что и в оптической резольвометрии [6]:  $R$  возрастает с уменьшением толщины слоя и увеличением содержания AgHal в нем.

Существенно отметить, что увеличение толщины слоя при фиксированном значении концентрации может и не влиять на разрешающую способность; это должно наблюдаться с того момента, как толщина начнет превышать пробег частиц в слое. В частности, в неразбавленной эмульсии пробег  $\alpha$ -частиц U<sup>238</sup> составляет 18—19 мк,  $\alpha$ -частиц Po<sup>210</sup> — 21—22 мк,  $\beta$ -частиц S<sup>35</sup> с максимальной энергией — около 100 мк (спрямленная длина),  $\beta$ -частиц Ca<sup>45</sup> и Sr<sup>90</sup> — соответственно больше. Поэтому

в исследованном нами интервале толщин указанные соображения могут относиться практически только к  $\alpha$ -излучателям; как можно заключить из рис. 2, при экспонировании U<sup>238</sup> и Po<sup>210</sup> разрешающая способность действительно достигает постоянного наинизшего значения, а при экспонировании  $\beta$ -излучателями продолжает монотонно убывать с ростом толщины слоя. При значительном разбавлении эмульсии пробег частиц существенно возрастает и даже для  $\alpha$ -частиц U<sup>238</sup> всегда превышает толщину эмульсионного слоя; это немедленно обнаруживается при сопоставлении данных на рис. 1 и 2.

В связи с исследованием высококонцентрированных эмульсий возникает следующий вопрос. Как известно, в ходе фиксирования этих эмульсий толщина слоя значительно уменьшается; так, для эмульсии типа Р слой претерпевает усадку порядка 2.5-кратной. Во время усадки проявленные зерна испытывают отнюдь не малые вертикальные смещения, тем больше, чем дальше расположены зерна от подложки. Не исключается, что одновре-

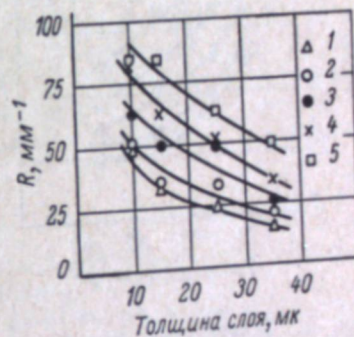


Рис. 1. Зависимость разрешающей способности разбавленной эмульсии (30% AgHal по весу) слоев эмульсии типа Р от их толщины. 1 — Po<sup>210</sup>; 2 — U<sup>238</sup>; 3 — Sr<sup>90</sup>; 4 — Ca<sup>45</sup>; 5 — S<sup>35</sup>.



менно они могут испытывать и горизонтальные смещения — беспорядочные или направленные. Тогда разрешающая способность слоя, определяемая после усадки, может отличаться от таковой до усадки. Поэтому представлялось целесообразным проделать следующий опыт.

Таблица 4

Разрешающая способность слоя неразбавленной эмульсии типа Р толщиной 35 мк до и после глицериновой ванны

	R (мм <sup>-1</sup> ) при экспонировании источником				
	Po <sup>210</sup>	U <sup>238</sup>	Sr <sup>90</sup>	Ca <sup>45</sup>	S <sup>35</sup>
До ванны . . . . .	25	33.3	33.3	50	62.5
После ванны . . . . .	25	25	33.3	50	50

Мы подвергли отфиксированные слои эмульсии Р пропитке в глицерине, восстановив тем самым их первоначальную толщину. Практика ядерной физики показывает, что этот прием не вызывает дополнительных

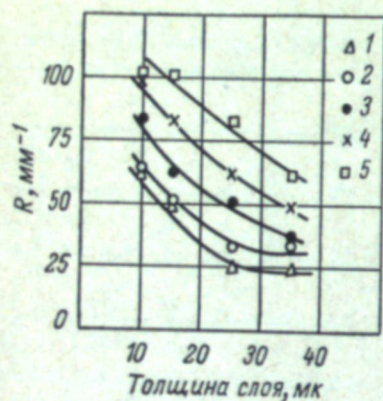


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности неразбавленных (85% AgHal по весу) слоев эмульсии типа Р от их толщины.

Обозначения те же, что на рис. 1.

искажений в следах частиц, т. е. не нарушает первоначального взаиморасположения зерен. Таким образом, если бы при усадке происходили значительные горизонтальные смещения зерен, то последующее набухание в глицерине должно было бы вернуть зерна на место. Однако, как показало измерение R отфиксированных слоев до и после глицериновой ванны (табл. 4), никакого повышения R слоя при восстановлении его толщины не достигается, а в отдельных случаях R даже уменьшается — вероятно за счет больших возможностей смещения зерен в набухшем слое, нежели в сухом. Если же подвергнуть купанию в глицерине отфиксированные слои неядерных эмульсий, где усадка незначительна, то уменьшение R становится совершенно отчетливым.

При рассмотрении приведенных выше данных обращает на себя внимание совпадение всех поддающихся сравнению закономерностей изменения разрешающей способности для действия света и частиц. Если в отношении прохождения R через максимум по мере роста оптической плотности (за счет экспозиции или за счет проявления — безразлично) такое совпадение обусловлено тождественностью методики измерения R, то в отношении зависимости R от толщины и концентрации эмульсионного слоя, а также от дисперсности эмульсии убедительного объяснения нет. Действительно, рассеяние света и рассеяние частиц в эмульсии не имеют ничего общего ни по природе, ни по закономерностям, а в случае частиц сравнительно большой массы (как α-частицы) рассеяние вообще не играет заметной роли. Тем не менее совпадение закономерностей разрешающей способности для света и частиц несомненно не является случайным, что видно, между прочим, из следующего. Как показал Фризер [7], спадание почернения на краях резкого фотографического изображения, полученного в моноэнергетическом электронном пучке, описывается тем же экспоненциальным законом, как и на краях резкого изображения, создаваемого световым пучком. Аналогичную закономерность получили

Егорова и Богомолов [2] для β-частиц со сплошным спектром энергий. Поскольку R в большой степени определяется именно характером убывания почернения на краях стрихов, то полученное совпадение закономерностей является естественным, хотя физическое его объяснение все еще остается недостаточным.

Совпадение закономерностей для действия света и частиц может иметь, как нам представляется, определенный практический интерес. В настоящее время влияние большого числа факторов на разрешающую способность изучено для случая действия света достаточно подробно. Между тем аналогичные исследования для действия частиц только начинаются и использование соображений аналогии при отсутствии достаточного фактического материала может пока сыграть немаловажную роль.

Практически важными могут оказаться также данные о зависимости разрешающей способности от толщины и концентрации эмульсионного слоя. По-видимому, при действии частиц (как и при действии света) наилучшими с точки зрения R слоями должны явиться тонкие поливы ядерных эмульсий. Дополнительным их преимуществом является мелкозернистость, а опасения ухудшить R вследствие усадки, как показали наши опыты, необоснованны, если вообще усадка играет какую-либо роль в тонких слоях (например, ~5 мк).

В заключение отметим, что, хотя зависимость R от некоторых факторов получилась в нашей работе такой же, как у других авторов [1,3], сами значения R в общем ниже, чем приводимые в литературе. Наиболее вероятной (хотя, возможно, и не единственной) причиной такого расхождения является то, что мы пользовались фотографическими материалами общего назначения и слоями нормальной толщины, тогда как другие авторы, как правило, пользовались очень тонкими слоями [1, 3] и специальными высокоразрешающими слоями [1, 4].

#### Выводы

1. Исследована разрешающая способность различных фотографических слоев при экспонировании их α- и β-частицами.
2. Показано, что как для α-, так и для β-частиц разрешающая способность убывает с ростом энергии частиц, т. е. пробега их в эмульсионном слое. По отношению к действию α-частиц, испускаемых естественными радиоактивными элементами, разрешающая способность в общем ниже, чем по отношению к действию β-частиц любых искусственно радиоактивных изотопов.
3. Зависимость разрешающей способности от ряда факторов одинакова для действия света и для действия частиц. Разрешающая способность возрастает при увеличении дисперсности твердой фазы и концентрации AgHal в эмульсии и уменьшении толщины эмульсионного слоя. С ростом оптической плотности резольвограммы (за счет экспозиции или проявления) разрешающая способность проходит через максимум.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Бойд. Авторадиография в биологии и медицине. ИЛ, М., 1957 (часть 1, гл. VI).
2. М. С. Егорова, К. С. Богомолов. Тр. НИКФИ, 32, 41, 1959.
3. Дж. Стивенс, сб. «Радиография», ИЛ, М., 319, 1952.
4. G. Lehnrfuhl, Z. Naturforsch., 16a, 716, 1961.
5. А. Л. Каргужанский, Б. П. Солтицкий, Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 7, 223, 1962.
6. П. Х. Прусс. Рассеяние света в эмульсионных фотографических слоях и их разрешающая способность. Канд. дисс. Л., 1961.
7. H. Frieser, E. Klein, Mitt. Agfa Leverkusen-München, 2, 121, 1958.

И. Р. ПРОТАС, В. М. ИВАНОВА

### ФОРМА И РАЗМЕРЫ КРИСТАЛЛОВ БРОМИСТОГО СЕРЕБРА, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ pH ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

Существенное влияние на рассеяние света эмульсионными слоями и на их разрешающую способность оказывают не только размеры (площадь проекции) кристаллов галоидного серебра, но и их форма [1, 2]. Было установлено, что при равенстве площадей проекции тонкие пластинчатые кристаллы AgBr рассеивают свет меньше, чем толстые. Соответственно слои, содержащие пластинчатые кристаллы, обладают при прочих равных условиях более высокой разрешающей способностью.

Имеющиеся в литературе сведения о факторах, определяющих форму эмульсионных кристаллов, очень скудны.

Известно, что при синтезе безаммиачных эмульсий по самым различным рецептам образуются в основном тонкие пластинчатые кристаллы и что присутствие аммиака в дисперсионной среде (в концентрации, большей 0.5 М) способствует образованию сравнительно толстых чечевицеобразных кристаллов [3].

В 1960 г. Хирата [4] опубликовал новые данные о форме кристаллов AgBr, образующихся при различных pH желатиновой среды. Полученные этим автором микрофотографии кристаллов показали, что в кислой среде (pH ≈ 3.5) большинство кристаллов (~90%) имеет хорошо ограниченную форму, в то время как в щелочной среде, создаваемой едким натром, (pH ≈ 10.5) лишь 10% кристаллов имеют хорошую огранку. Наблюдения Хирата привели его к выводу, что в щелочной среде образуются более толстые кристаллы AgBr, чем в кислой. Однако эти данные являются лишь качественными.

Представляло интерес измерить толщины кристаллов AgBr, образующихся при различных pH дисперсионной среды, и выяснить, происходит ли при подкислении растворов образование более тонких кристаллов, чем в обычных безаммиачных эмульсиях, и существует ли различие в толщинах кристаллов, возникающих в щелочной среде, создаваемой едким натром или аммиаком.

Для измерения толщин эмульсионных кристаллов был применен, как и в ранее опубликованной работе [3], интерферометрический метод, разработанный еще в 1949 г. П. В. Мейкляром и П. Х. Прусс [5]. Эти авторы показали, что с помощью микроинтерферометра Линника [6] с 90× объективами и специального светофильтра можно измерить толщины эмульсионных кристаллов. При этом с достаточной точностью измеряются кристаллы, размеры которых не менее 0.5 мк<sup>2</sup>.

При выборе эмульсий мы стремились к тому, чтобы условия синтеза были близки к условиям синтеза эмульсий Хирата и чтобы эмульсии были низкодисперсными. Поэтому в основу синтеза была положена безаммиачная чисто бромосеребряная эмульсия.

В опытах применялся как одноструйный, так и двухструйный метод эмульсификации. При одноструйном методе раствор AgNO<sub>3</sub> вливался в течение 25 сек. в желатиновый раствор KBr, содержащий уксусную кислоту или едкий натр. При двухструйном методе эмульсификации растворы, содержащие эквивалентные количества KBr и AgNO<sub>3</sub>, одновременно в течение 25 сек. вливались в желатиновый раствор KBr. В последний предварительно вводились также уксусная кислота или едкий натр.

Физическое созревание всех синтезированных эмульсий длилось 120 мин. при 60° С. Сверхэквивалентный избыток KBr при созревании во всех эмульсиях составлял 0.3 М, концентрация AgBr равнялась 0.82 М. Тип желатина и его концентрация в разных опытах были различны. Применялись инертный и высокоактивный желатин в концентрациях 3.5 или 10 вес. %.

По окончании физического созревания эмульсии охлаждались до 30° С и коагулировались насыщенным раствором сульфата натрия. В щелочные эмульсии перед коагуляцией вводилась уксусная кислота для нейтрализации щелочи. Затем коагуляты промывались декантацией водой и расплавлялись.

Из полученных эмульсий приготавливались однослойные препараты — на отражающем алюминированном предметном стекле для определения толщины кристаллов и на обычном предметном стекле для проведения дисперсионного анализа микрофотографическим методом [7].

При измерении толщин эмульсионных кристаллов определялся сдвиг интерференционных полос на кристалле AgBr по отношению к полосам на желатине, в котором этот кристалл суспендирован. Вычисление толщины эмульсионных кристаллов производилось по формуле

$$h = K \frac{\lambda}{2(n_1 - n_2)} = 0.38 K,$$

где  $\lambda$  — длина волны света, в данном случае равная 555 мкм;  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления AgBr ( $n_1 = 2.253$ ) и желатина ( $n_2 = 1.530$ ) [9, 10];  $K$  — число интерференционных полос, определяемых с точностью до 0.2 полосы, на которое произошел сдвиг их в кристалле.

Для каждого кристалла параллельно с измерением толщины определялась площадь его проекции, причем интерференционная картина играла здесь роль окулярной шкалы.

В исследуемых эмульсиях была измерена толщина 30—40 кристаллов. Далее измеренные кристаллы группировались по размерам площади проекции на классы и определялась толщина эмульсионных кристаллов данного класса (средняя для 6—7 измеренных кристаллов).

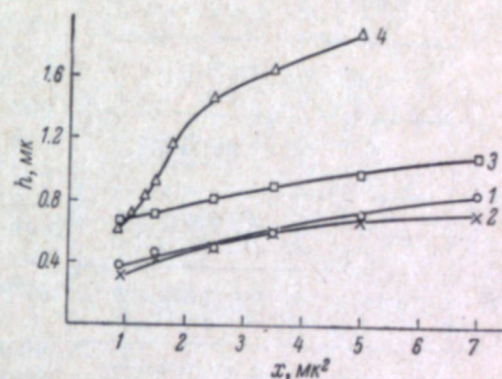


Рис. 1. Зависимость толщины кристаллов  $h$  от их площади проекции  $x$  (усредненные кривые).

1, 2, 3 — безаммиачные эмульсии с pH, примерно равными 3.5, 5.6 и 10.5; 4 — аммиачные эмульсии с pH = 11.0.



шает число кристаллов в единице объема вследствие увеличения толщины кристаллов.

В заключение считаем своим приятным долгом выразить благодарность канд. физ.-мат. наук П. Х. Прусс и Ю. А. Кракау за ряд ценных советов и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Р. Протас, З. И. Грацианская, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, П. Т. Сидоренкова, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 7, 96, 1962.
2. П. Х. Прусс, настоящий сборник, 235.
3. И. Р. Протас, П. Х. Прусс, Ю. А. Кракау, Журн. прикл. химии, 22, 823, 1949.
4. A. Hirata, J. Soc. Sci. Phot. of Japan, 23, 17, 1960.
5. П. В. Мейкляр, П. Х. Прусс, Журн. техн. физики, 19, 1041, 1949.
6. В. П. Линник, Докл. АН СССР, 1, 18, 1933.
7. С. В. Чердынцев, Тр. Гос. оптич. инст., 9, 3, 1933.
8. Handbook of Chemistry and Physics. Ed. 37. Chem. Rubber, Publ. Co, 1955—1956.
9. P. Kowaliski, Sci Ind. Phot., 16, 211, 1945.
10. К. С. Ляликов. Теория фотографических процессов. Изд. «Искусство», М., 207, 1960.
11. Г. П. Фаерман, К. А. Августиневич, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 2, 176, 1957.
12. S. E. Sheppard, R. H. Lambert, R. L. Keenan, J. Phys. Chem., 36, 171, 1932.

#### СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От редакции . . . . .	3
К. В. Чибисов. Вступительное слово на 13-м совещании по научной фотографии . . . . .	5
<b>I. Качество оптического изображения</b>	
А. Т. Ащеулов, Т. А. Павличук, М. Д. Хухрина. Оценка фотографических систем методом частотно-контрастной характеристики по синусоидальной решетке . . . . .	7
А. Т. Ащеулов, Н. П. Березин. Измерение частотно-контрастных характеристик фотографических объективов . . . . .	15
Р. А. Красковский. Вычисление энтропии оптического изображения и определение эффективных размеров фигур рассеяния . . . . .	23
В. А. Матвеев. Оценка качества фотографических объективов по угловому пределу разрешения . . . . .	31
Ф. С. Новик, М. М. Щеглов. Экспериментальное исследование краевой резкости, даваемой киносьемочными объективами . . . . .	34
А. Л. Яриновская. Оценка качества киносьемочных объективов по критерию резкости. (Автореферат) . . . . .	42
Ф. С. Новик, А. П. Аксенчиков. Измерение частотно-контрастной характеристики киносьемочных объективов * . . . . .	44
<b>II. Качество фотографического изображения</b>	
И. Б. Блюмберг, Т. М. Зязина. Исследование качества кинематографического изображения . . . . .	50
Ю. К. Вифанский, Ю. Н. Гороховский. Пограничные кривые и резкость черно-белого фотографического изображения . . . . .	58
Ю. Н. Гороховский, Г. И. Лозневой. Пограничные кривые и резкость цветного фотографического изображения . . . . .	68
Г. А. Истомин. Объективный критерий информационной способности. (Автореферат) . . . . .	75
Г. А. Истомин, И. Г. Абидина, З. Л. Петрушкина. Функция контрастности черно-белых и цветных фотографических материалов и резкость изображения. (Автореферат) . . . . .	77
В. Г. Комар. Критерий резкости изображения и ее оценка в различных системах кинематографии . . . . .	79
В. А. Корндорф, И. А. Черный. О стандартизации резольвометрических измерений . . . . .	90
К. С. Ляликов, Е. Г. Ивкина. Энтропия аэроснимка . . . . .	94
В. Я. Михайлов. Сенситометрическая оценка качества черно-белых и цветных аэронегативов . . . . .	102
Е. А. Букатин. Оптика проявленного диаизображения. Линзовый эффект * . . . . .	108
К. В. Вендровский, И. З. Пакушко. Образование ореолов отражения в фотографических слоях * . . . . .	116
<b>III. Телевизионное изображение и его связь с фотографическим изображением</b>	
В. С. Гдалин. Оценка качества изображения, воспроизводимого телевизионными приемными трубками . . . . .	123
С. Б. Гуревич. Об аналогии характеристик воспроизведения в телевидении и фотографии . . . . .	130
В. А. Махонин. Телевизионные методы повышения визуальной резкости фотографических изображений . . . . .	142
А. М. Халфин. Потенциальные возможности увеличения контрастной чувствительности телевизионных камер. (Автореферат) . . . . .	146
	267

IV. Иные виды изображений

А. В. Луизов. Изображение на сетчатке и его преобразование в зрительной системе	148
В. Р. Муратов, Е. В. Нилов. Качество изображения, наблюдаемого на экране электронно-оптического преобразователя	156

V. Зернистая структура фотографических изображений

С. Б. Гуревич, И. И. Брейдо, Г. А. Гаврилов. Методика измерения отношения сигнал/шум в фотографии	163
С. Б. Гуревич, И. И. Брейдо, Г. А. Гаврилов. Функция распределения числа проявленных зерен и зависимость фотографических шумов от оптической плотности почернения	171
Т. М. Левенберг. О точности измерения макрозернистости почернений фотографическим проекционным методом	175
В. П. Баранова, Ю. Н. Гороховский. Исследование фотометрического эквивалента почернений*	181
Т. М. Левенберг, Л. К. Локуциевская. Определение макрозернистости однокрасочных позитивных цветных полей фотографическим проекционным методом*	195

VI. Фотографические материалы и их химико-фотографическая обработка с точки зрения качества изображения

С. Г. Богданов, А. Л. Шамшева. Формирование изображения мелких деталей при проявлении в проявителях различных типов	202
В. А. Вейденбах, П. И. Левина. Исследование фотографических свойств светочувствительных материалов, подвергнутых быстрому проявлению	214
Г. Г. Грибакин, Г. А. Истоин, З. Л. Петрушкина. Сравнение различных способов оценки рассеяния и отражения света в эмульсионном слое. (Автореферат)	219
В. Л. Зеликман, Ф. С. Шерман, В. А. Дмитриева, Е. Б. Кондратьева. Применение диффузиметрического метода определения резкости фотографического изображения в технологии изготовления тонкослойных кинофотоплёнок	221
И. Р. Протас, П. Т. Сидоренкова, Т. В. Рыжкова. Об эмульсионных факторах, определяющих разрешающую способность светочувствительного слоя	230
П. Х. Прусс. Рассеяние света в эмульсионных слоях и их разрешающая способность	235
И. Б. Блюмберг, Л. И. Федорук. Кинетика последовательных реакций в фотографическом процессе и резкость изображения*	243
Ю. Н. Гороховский, П. Х. Прусс. Исследование взаимосвязи между разрешающей способностью и макрозернистостью черно-белых фотографических материалов*	248
А. Л. Картужанский, Б. П. Солтицкий. Разрешающая способность фотографических слоев, экспонируемых ядерными излучениями*	253
И. Р. Протас, В. М. Иванова. Форма и размеры кристаллов бромистого серебра, образующихся при различных рН дисперсионной среды*	262

ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
26	11 сверху	изображений	изображения
182	8 »	+0.02	±0.02
187	16 »	$\nu = 2.0$	$\gamma = 2.0$
218	19 »	на 5 групп	на 4 группы
263	10 снизу	[9, 10]	[8, 9]
263	Подпись под рис. 1, 1 снизу	11.0	10.5

Успехи научной фотографии, № 582.