

## Цветная фотография Максвелла<sup>1</sup>

*Р. М. Эване*

Сто лет назад великий физик получил полноцветную фотографию. Как это было сделано, представлялось загадочным. Чудо удалось понять, повторив его эксперимент.

В 1861 г. великий английский физик Джеймс Клерк Максвелл<sup>2</sup> продемонстрировал первую в мире трехцвет-

<sup>1</sup> В связи со 100-летием со дня первой демонстрации цветной фотографии 16—18 мая 1961 г. в Лондоне состоялась научная конференция, посвященная этой дате. Был зачитан ряд докладов по тем вопросам, изучением которых занимался Максвелл (по физиологии цветового зрения, по проблемам цветной печати, современной колориметрии, цветной фотографии), в том числе — доклад Р. М. Эванса «Цветная фотография Максвелла». Материалы этой конференции см. в «Journal of Photographic Science», т. 9, № 2, 4, 1961.

Осенью того же года состоялась III международная выставка фотографии, кино и оптики в Париже. Ее девизом было: «показать триумф цвета в фотографии». На ней впервые были продемонстрированы фотографии, снятые на цветной пленке, общая чувствительность которых сравнивалась с чувствительностью лучших черно-белых пленок. Выставка наглядно показала, каких больших успехов достигла цветная фотография за сто лет.

<sup>2</sup> К тому времени, когда состоялась эта лекция, Максвелл уже опубликовал пять работ, относящихся к учению о цветах. В них он рассматривал вопросы, связанные с физиологической теорией цвета, исследовал ощущения, вызываемые различными цветами, у людей с нормальным зрением и у слепых к цвету. Основное внимание он уделял количественным методам исследования всевозможных комбинаций цветов и различению смеси цветов.

Стоит указать еще, что за работы по смешению цветов и оптике Королевское общество в 1860 г. присудило ему премию Румфорда.

ную фотографию во время лекции в Королевском институте в Лондоне. Используя различные проекторы, он наложил три изображения, полученные при фотографировании цветной ленты отдельно через красный, зеленый и синий фильтры. Каждое изображение проектировалось в том свете, в каком снималось<sup>1</sup>. Видимо, Максвелл использовал фотографию для демонстрации того, что полный спектр цветов может быть получен со светом именно трех цветов<sup>2</sup>, а это подкрепляло трехкомпонентную теорию цветового зрения, выдвинутую Томасом Юнгом около 1800 г. Представляется также, что он хотел доказать, что для такой демонстрации подходят красный, синий и зеленый цвета, а не красный, синий и желтый (как считали некоторые исследователи). Максвелл предполагал, что изображения на его фотографиях представляли «красную, зеленую и синюю части [цветной ленты] отдельно, так, как их воспринимала бы, согласно Юнгу, каждая из трех систем нервов».

В том, что показывал Максвелл, одно вызывает удивление: у него ничего не должно было получиться. Вполне точно, что фотографические эмульсии, имевшиеся в распоряжении Максвелла в 1861 г., были чувствительны только к крайнему синему концу спектра и вообще не чувствительны к зеленой, желтой и красной частям спектра. Но тогда мог ли Максвелл получить «зеленое» и «красное» изображения раздельно (фактически черно-белые диапозитивы), чтобы вставить их в проекторы?

<sup>1</sup> В демонстрации Максвелла цвета трех изображений складывались, давая красочную картину объекта. На этом, аддитивном, принципе смешения цветов основаны теперь все системы цветного телевидения и многие методы визуальных цветовых измерений.

В современных цветной фотографии и кино используется субтрактивное смешение цветов — оно получается при последовательном прохождении света через ряд цветных светофильтров. Пленки для цветной фотографии и кино многослойные; они состоят из трех эмульсионных слоев, каждый из которых чувствителен соответственно к сине-фиолетовой, зелено-желтой и оранжево-красной частям спектра. Дополнительно в слои вводится цветообразующее вещество, присутствие которого необходимо для последующего образования красочного изображения.

<sup>2</sup> Мысль продемонстрировать трехкомпонентную теорию средствами фотографии возникла у Максвелла задолго до ее осуществления — в 1855 г. См.: Maxwell. Scientific Papers. P., т. I, стр. 126.



Несомненно, демонстрация Максвелла была достаточно успешной, чтобы убедить и произвести впечатление на аудиторию. Вывод самого Максвелла, поддержанный и другими, состоит в том, что «когда эти [разные проектируемые позитивы] налапались, то было видно цветное изображение, которое в том случае, когда красное и зеленое изображения получились так же хорошо, как синее, было действительно цветным изображением ленты». Таким образом, Максвелл признавал, что красное и зеленое изображения имели какой-то недостаток, но последующее поколение специалистов по фотографии оставалось в полном недоумении, как он мог вообще получить какие-либо красные и зеленые изображения. Недавно мои сотрудники и я в отделе технологии цветной фотографии фирмы Истмен Кодак повторили опыт Максвелла в соответствии с отчетами того времени и мы полагаем, что можем утверждать принципиальную невозможность получить такие изображения.

Фотографические детали опыта записаны не Максвеллом, а Томасом Саттоном, учителем и лектором по фотографии, к которому Максвелл обратился за технической помощью в подготовке лекции. Саттон был некоторое время редактором интересного издания — оно называлось «Заметки по фотографии», а позднее конструировал широкоугольные линзы, что для того времени было замечательно.

Объектом Саттона был «бант, повязанный из разноцветной ленты», который он поместил на фоне черного бархата и сфотографировал при ярком солнечном свете. Фотографическая эмульсия, использованная Саттоном, представляла собой влажный коллодий со светочувствительным материалом — иодистым серебром. Иодистое серебро чувствительно только к излучению с длинами волн короче 430  $m\mu$ . А эта длина волны приходится на крайнюю синюю область видимого спектра. Обычно глаз чувствителен к излучению от 400 до 700  $m\mu$ . Цвет (правильнее — окраску) мы определяем как зеленый приблизительно между 480 и 560  $m\mu$ , как желтый — между 560 и 590  $m\mu$ , как оранжевый — от 590 до 630, и как красный — свыше 630  $m\mu$ . Ко всем этим длинам волн иодистое серебро нечувствительно.

В качестве красного, зеленого и синего фильтров Саттон использовал стеклянные кюветы с окрашенными растворами металлических солей; для желтого фильтра он

взял кусок «стекла лимонного цвета». Мы не можем точно подобрать желтое стекло, но это и не так существенно для опыта. Вот описание самого Саттона фильтров и экспозиций:

«Первое. Вначале непосредственно перед линзой помещалась ванночка из зеркального стекла, содержащая аммиачный раствор сульфата меди. Эту соль химики используют для получения того синего раствора, который в бутылках выставляют между оконными рамами. При экспозиции 6 секунд был получен отличный негатив. Эта экспозиция примерно в два раза превышала ту, которая требовалась при отсутствии окрашенного раствора.

Второе. В подобной ванночке содержался зеленый раствор хлорида меди. Негатив не был получен и при экспозиции 12 минут, хотя изображение было хорошо видно на матовом стекле. Поэтому сочли целесообразным значительно разбавить раствор; таким образом, сделали зеленую окраску воды намного слабее и в конце концов получили удовлетворительный негатив при экспозиции 12 минут.

Третье. Затем поместили перед линзой пластинку из стекла лимонного цвета и при двухминутной экспозиции получили хороший негатив.

Четвертое. Был получен хороший негатив при экспозиции 2 минуты, когда использовали такую же, как и ранее, ванночку, из зеркального стекла, содержащую красный раствор тиоцианата железа.

Толщина жидкости, через которую должен был пройти свет, составляла около  $\frac{3}{4}$  дюйма.

Негативы, полученные описанным выше способом, были отпечатаны на стекле, используя тиннин, и показаны как диапозитивы. Изображение, полученное при фотографировании через красный фильтр, на лекции освещалось красным светом, через синий — синим, через желтый — желтым, через зеленый — зеленым; и когда эти различно окрашенные изображения налапались, на экране возникала фотография полосатой ленты естественной окраски».

Из других источников достаточно ясно, что на лекции Максвелл не использовал позитив в желтом свете, хотя Саттон утверждает обратное. Фактически он использовал при одной демонстрации свет разных цветов, чтобы показать, как красный и зеленый в комбинации дают желтый.



В 1940 г. Дуглас А. Спенсер из Кодак Лимитед сообщил, что оригиналы позитивов, использованных Максвеллом, еще находятся в Кембриджском университете в лаборатории Кавендиша. Спенсер взял на время эти позитивы и опубликовал цветную репродукцию, которая показывает, каким могло казаться проектируемое изображение слушателям лекции Максвелла. На этой репродукции можно видеть красные, зеленые, синие и фиолетовые цвета, а фон зеленый.

Для того чтобы продолжить обсуждение данного вопроса, мы смогли благодаря любезности Спенсера, лаборатории Кавендиша и Кодак Лимитед достать другой комплект позитивов. Если считать, что использованные эмульсии были чувствительны только к синему, то достаточно курьезно, что на изображении синий не представлен весьма значительно. Так как цвета ленты неизвестны, то невозможно сказать, соответствует ли это действительно сти или нет.

Казалось, лучший путь разрешения загадки красного и зеленого изображений — попытаться повторить работу Саттона. Чтобы это сделать, было желательно (хотя и не существенно) иметь фотоматериал той же чувствительности, что и у него. Материал, чувствительный от 430 *m* $\mu$  и ниже, был специально подготовлен для этого опыта моим коллегой Бертом Х. Кэрролом из исследовательской лаборатории Кодак.

Новая эмульсия была, конечно, более «быстрой» (*faster*) чем та, которой пользовался Саттон, но это само по себе не создавало трудности. Важно было воссоздать в надлежащей концентрации растворы, которые Саттон использовал как фильтры. В его отчете нет указания на их концентрации. Тем не менее он делает одно существенное замечание, когда говорит, что с синим жидкостным фильтром экспозиция в два раза больше, чем вообще без фильтра: шесть секунд по сравнению с тремя секундами.

Соответственно мы приготовили растворы тех же металлических солей, что у Саттона, и подбирали их концентрации до тех пор, пока экспозиции для красного, зеленого и синего не оказались в том же отношении, что и у Саттона. Для получения «синего» изображения концентрация аммонизированного сульфата меди («аммиачного раствора сульфата меди») была так подобрана, что картинка, снятая через кювету в  $\frac{3}{4}$  дюйма, с раствором

дала «совершенный» негатив при экспозиции, вдвое превышающий ту, которая применялась при съемке без фильтра. Для получения зеленого изображения концентрация хлорида меди была понижена, пока «в конце концов, не был получен подходящий негатив» при экспозиции в 120 раз больше, чем с синим фильтром. Разбавление было столь значительным, что раствор более не казался глубокого зеленого цвета, а стал сине-зеленым. Химики давно знают, что цвет хлорида меди изменяется при разбавлении раствора. И, наконец, мы приготовили красный фильтр из роданистого железа («тиоцианат меди») и с ним хороший негатив получили при экспозиции, в 80 раз превышающей экспозицию с синим фильтром. Когда мы использовали эти фильтры, чтобы сфотографировать натюрморт, изображающий различные ткани, и затем спроектировали отдельные черно-белые позитивы, освещая их через цветные фильтры, как делал Максвелл, то полученная картина оказалась удивительно красочной репродукцией оригинала. Правда некоторые окраски были значительно сдвинуты по свойству; тем не менее мы смогли получить синий, зеленый, желтый, красный и фиолетовый. При желании отдельные негативы (или позитивы) могут быть отпечатаны на стандартной цветной пленке для получения цветного диапозитива. В этом случае негативы были получены с интерференционными фильтрами, которые по своему действию соответствовали жидкостным фильтрам Саттона.

А теперь — объяснение. Ясно, что наша пленка, как у Саттона, чувствительна только к крайнему синему и ультрафиолету. Тот факт, что изображения были получены не только с синим, но также с зеленым и красным фильтрами, указывает на то, что все растворы пропускают свет с длиной волны короче, чем 430 *m* $\mu$ . Другими словами, единственным излучением, действовавшим на эмульсию, был свет крайнего синего конца видимого спектра и еще более короткое невидимое излучение в ультрафиолете. Наша линза, которая во многом подобна линзе Саттона, пропускала ультрафиолет до 325 *m* $\mu$ . Длины волн, пропущенных линзой и тремя растворами (разбавленными), показаны на спектрофотометрических кривых (рис. 1).

Сразу же ясно, что три фильтра достаточно четко делят синюю и ультрафиолетовую области спектра на три



отдельные области, хотя зеленая содержится внутри синей. Совершенно случайно оказалось, что фильтры, выбранные Саттоном для разделения видимого спектра, действуют аналогичным образом в относительно узком

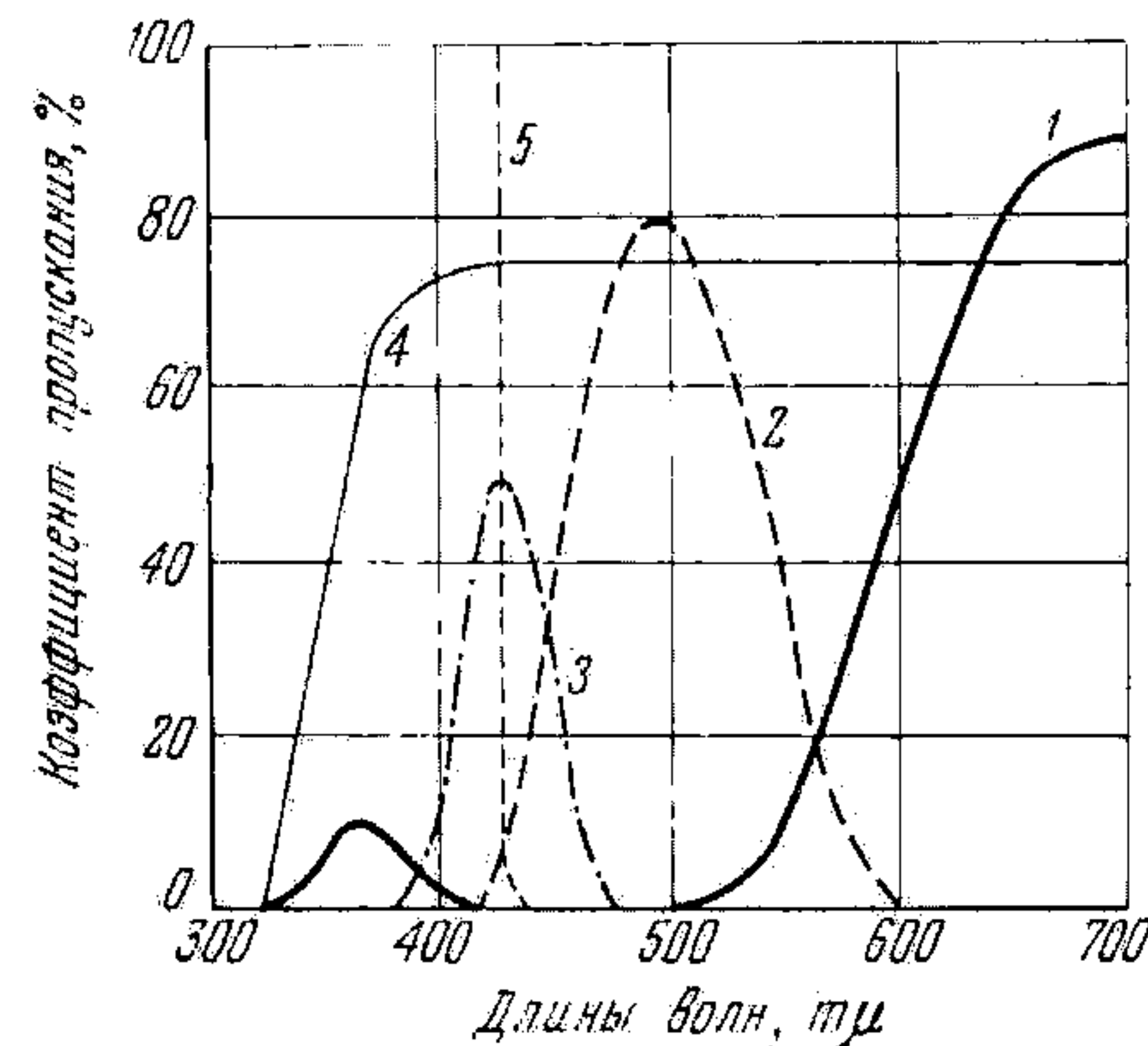


Рис. 1. Спектральная чувствительность фотопластинок  
1 — красный фильтр; 2 — зеленый фильтр; 3 — голубой фильтр; 4 — стеклянная отсечка; 5 — пленочная отсечка

участке света с малой длиной волны. Глядя на эти кривые, следует помнить, что при зеленом фильтре экспозиция была в 120 раз, а при красном — в 80 раз больше, чем при синем. При построении кривых эти коэффициенты не учитывались.

Теперь можно понять, как синий может быть отделен от других цветов и как настоящий зеленый может быть отделен от синего. Но тотчас могло бы показаться, что все, окрашенное в красный, вовсе неразлично. Оказывается, многие красные краски отражают не только свет, который мы видим как красный, но также много и ультрафиолета (рис. 2). Поэтому красный предмет может дать четкое изображение на «красной» пластинке не потому, что он красный, а потому, что он более ультрафиолетовый, чем те предметы, которые воспринимаются нами как зеленые и синие. Мы не знаем, конечно, в какие красные тона была окрашена лента, сфотографированная Саттоном. Более того, нет вообще описания ее цвета, значит, мы не можем быть уверены в том, что участки ленты, которые получились более яркими у Саттона на красной пластинке, были действительно красного, а не какого-либо другого цвета с высокой отражаемостью в ультрафиолете. Кажется невероятным, однако, чтобы

Максвелл показывал фотографию, если бы красные пятна не были на своих местах. Если это так, то они были созданы ультрафиолетовой — красной окраской ленты, — счастливый случай, который ни Максвелл, ни Саттон не могли предвидеть.

Из рассмотрения позитивов Максвелла можно заключить, что в дополнение к тому, что фильтры произвели разделение по длинам волн, действовал и ряд других факторов, которые дополнили окраску проектируемой им картины. Во-первых, «подходящий» зеленый негатив был сильно недоэкспонирован. Во-вторых, область контраста на трех негативах очень различна. Только эти технические дефекты должны были бы добавить цвета, которых не было у оригинала. Например, черный бархатный фон, видимо, казался зеленым на картинке, которую проектировал Максвелл.

Кроме того, позитивы Максвелла из Кавендишской лаборатории совершенно желтые. Если они были желтыми ко времени лекции 1861 г., то необходимо еще рассмотреть дополнительные изменения контрастности, а значит, и цвета. Мы не можем точно узнать, что за источники света были «волшебные фонари» Максвелла, но

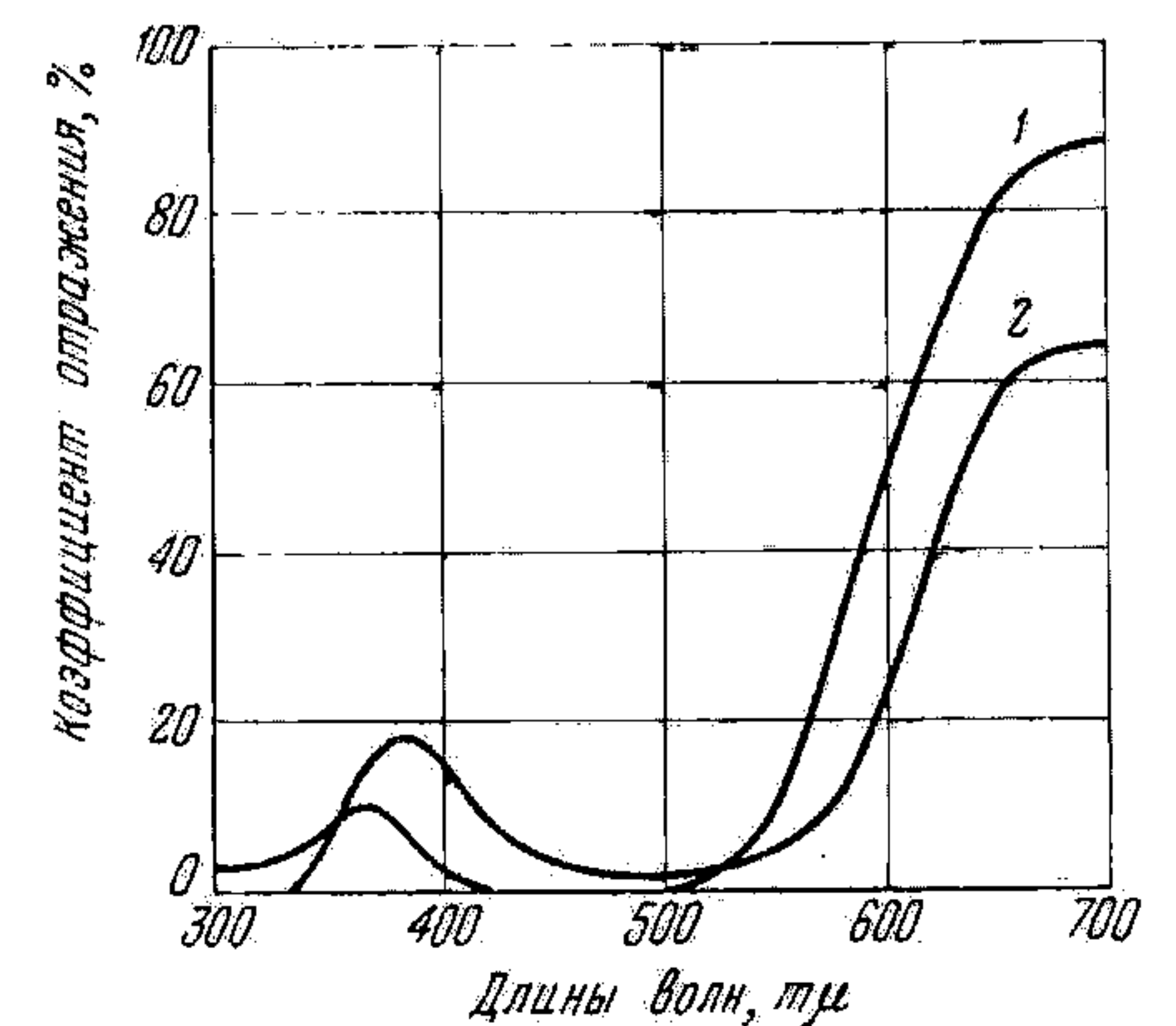


Рис. 2. Спектральный анализ красной ткани  
1 — красный фильтр; 2 — красная материя

тиничным волшебным фонарем того времени был известный друммондов свет, в котором брусок углекислого кальция нагревался до белого каления в пламени окиси водорода. Такие лампы дают значительно более синий



свет, чем газокалильные, используемые сейчас в домашних проекторах. Возможно также, что проекторы Максвелла включали дугу с угольными электродами, которые давали свет более горячий и синий, чем друммондов. В любом случае желтый цвет позитивов должен был придавать изображению, которое проектировалось через синий фильтр, большую контрастность, чем изображению, проектируемому через красный фильтр. Изображение, проектируемое через зеленый фильтр, должно было по контрастности занимать промежуточное положение.

Однако не все обнаруженные эффекты были вызваны различием в контрастности и плотности. То, что цвета действительно разделялись между красной, зеленой и синей картинками, может быть продемонстрировано наложением одного негатива, скажем красного, на зеленый или синий позитив. При использовании негативов, различных по контрастности, было бы возможно «вычистить» (blank out) позитив, если негатив и позитив действительно подобны. Но никакая комбинация негативов, полученных по позитивам Максвелла, не приводит к такому результату. Существует меньшее, чем мы могли ожидать, отличие между зеленым и синим, нежели между синим и красным. Если вспомнить главный тезис Максвелла, кажется несколько ироническим то, что желтый негатив по существу такой же, как и зеленый, и, вероятно, мог бы быть заменен им при незначительном изменении результата.

Хотя наша интерпретация эксперимента Максвелла представляется правдоподобной, все-таки остается некоторое сомнение. Возможно ли, что коллодиевые пластинки Саттона в какой-то мере обладали чувствительностью к красному и зеленому цвету? Теперь известно, что при определенных, не совсем обычных обстоятельствах такая чувствительность может иметь место даже без применения сенсibilизирующих красителей, которые не были открыты до 1874 г.

Эти сомнения были, к счастью, рассеяны открытием, которое мы сделали однажды, изучая диапозитивы Максвелла. При фотографировании Саттон использовал «портретную линзу с полной апертурой». Это могла быть только линза Петцваля, а она не покрывала всей пластины; значит, изображение было ограничено кругом меньшей площади, чем пластина. Мы отмечали, что не все

диаметры этих кругов одинаковы. Синий позитив имеет наименьший диаметр, зеленый — больший диаметр, а красный — самый большой. Очевидно, Саттон для каждого цвета света производил перефокусировку, и для красного света линза была наиболее удалена от пластины.

Сразу же объясняется то, что прежде ставило в тупик: красное изображение было значительно менее четким из всех трех. Саттон сфокусировал свою камеру для видимого красного света, а фотографировал в невидимом ультрафиолете.

Удивительно, таким образом, что все вместе хорошо подошло. Но мы все еще не освободились от мистификации в главном. Кажется странным, что Максвелл, один из главных авторитетов по цвету в свое время, мог не представлять того, что влажные коллодийные пластины не чувствительны к зеленому и красному. Тем не менее мы вынуждены поверить, что это так. Он едва ли предполагал, что демонстрация будет такой, как он ее себе представлял. Саттон тоже не знал точно об отсутствии чувствительности к зеленому. Действительно он рассматривал это как важное открытие, вытекающее из эксперимента. Он писал: «Теперь мы знаем, почему так трудно воспроизвести на фотографии детали зеленых предметов в тени... Следовательно, фотограф, который снимает плохо освещенную листву, не должен быть разочарован, если вместо многих прекрасных деталей он обнаружит на негативе отвратительные пятна чистого стекла».

Коллодийные эмульсии были открыты только лет за 10—12 до того и обладали настолько большей чувствительностью, чем прежние фотоматериалы, что, возможно, заключили, что они обладают некоторой чувствительностью ко всем длинам волн, хотя и значительно меньшей к длинным волнам, чем к коротким. Безусловно, спектрофотометрия еще не была развита настолько, чтобы Максвелл и Саттон имели возможность угадать правильное объяснение своих результатов.

Как бы то ни было, но принцип, изобретенный Максвеллом и осуществленный на практике Саттоном, был правильным для получения цветной фотографии. И вследствие счастливого стечения обстоятельств, о которых мы говорили, эксперимент удался, позволив Максвеллу открыть трехцветную фотографию почти на 15 лет раньше, чем были найдены светочувствительные красители, которые смогли сделать его опыт «возможным».