

ТЕХНИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ

Июль/август 2026

Технология мультиспектрального сканирования и постобработки для передачи цвета исторической киноплёнки

Барбара Флюкигер (Barbara Flueckiger), Джорджо Трампи (Giorgio Trumphy)

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОЦИФРОВКА // МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ // ЦВЕТ КИНОПЛЁНКИ // НАУКА О ЦВЕТЕ (COLOR SCIENCE) // КУЛЬТУРНОЕ НАСЛЕДИЕ

Аннотация

Технология мультиспектральной оцифровки (multispectral digitization), использующая равномерное распределение спектральных полос по всему видимому диапазону, способна существенно улучшить результаты и обеспечить надёжную документацию разнородных архивных цветных киноплёнок. Она также расширяет возможности для инновационного рендеринга (rendering), совместимого с будущими технологиями кинопроекции. Снижение субъективного вмешательства при оцифровке киноплёнки остаётся краеугольным камнем этики реставрации (restoration ethics). Мультиспектральное сканирование напрямую использует информацию, заложенную в исторической киноплёнке, обеспечивая надёжную, основанную на материале технологию, уважающую уникальные свойства каждого киноэлемента. Интегрированная цепочка мультиспектральной оцифровки и постобработки поддерживает физически точный рендеринг сканов за счёт включения измерений различных источников света кинопроекторов (projection illuminants). Цель этой технологии — воспроизвести цветовой облик изображения таким, каким он воспринимался бы на киноэкране. Опираясь на более чем десятилетний опыт исследований технологии и эстетики цвета исторической киноплёнки и её сканирования, мы объединили эти знания в практическом решении.

За последние два десятилетия развитие киносканеров (film scanners) носило преимущественно постепенный характер, хотя бизнес-модель и области применения изменились коренным образом.

Большинство используемых сегодня профессиональных киносканеров изначально проектировались под хромогенную (chromogenic) негативную киноплёнку для процесса Digital Intermediate (DI) начала 2000-х годов. Когда кинопроизводство полностью перешло на цифровые технологии, производители сканеров переориентировали свои системы на архивное применение, внося лишь незначительные изменения в механическую и оптическую конструкцию. По мере развития цифровых технологий и перехода кинопроекции на цифру распространение архивных фильмов также стало полностью цифровым. Это породило по-прежнему активно развивающееся направление: миллионы часов архивной киноплёнки нуждаются в оцифровке, что поддерживается как государственными инициативами, так и частным финансированием.

Тем не менее, несмотря на спрос, понимание специфических требований к исторической цветной киноплёнке — под которой мы понимаем все процессы получения цвета на киноплёнке, изобретённые и применявшиеся до середины 1990-х годов — остаётся ограниченным.

Подавляющее большинство из сотен цветных процессов, разработанных за историю кинематографа, принципиально отличаются от хромогенных негативов. Их красители и пигменты обладают своеобразными (idiosyncratic) спектральными характеристиками, которые

современные сканеры не способны полноценно зафиксировать. Часть этих цветов выходит за пределы современных стандартных цветовых пространств (color spaces) (DCI-P3, BT.709, BT.2020). В результате сканы зачастую не дают полного и неискажённого представления изображения, пригодного как отправная точка для постобработки (рис. 1).

Поэтому необходим новый подход, охватывающий весь спектральный диапазон исторической киноплёнки и уделяющий особое внимание её освещению при проекции. При кинопроекции материальный состав киноплёнки и оптический путь света в проекторе в сочетании с конкретным источником света (illuminant) вместе определяют уникальный облик фильма на киноэкране.

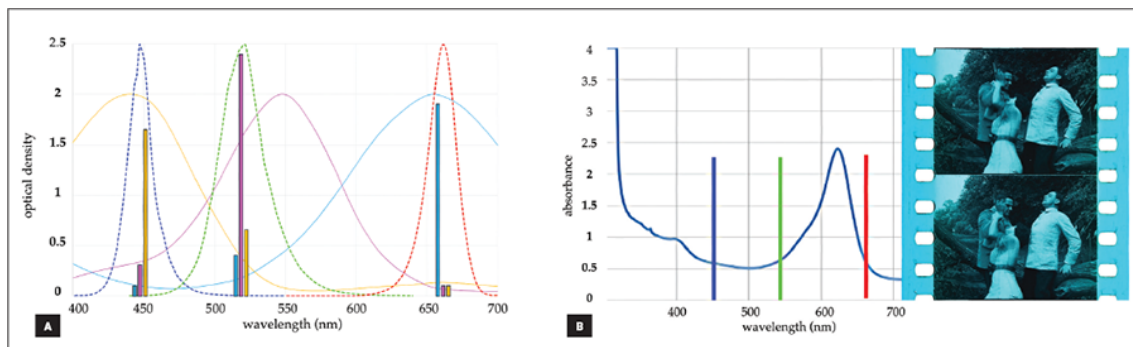


РИС. 1. (а) показывает, как один пиксель СМУ-плёнки (CMY-плёнки, субтрактивной цветной плёнки на основе голубого, пурпурного и жёлтого красителей) фиксируется киносканером с типичными RGB-кривыми спектральной чувствительности. Каждый красочный слой вносит вклад в регистрируемый сигнал в соответствии со своей оптической плотностью и кривыми чувствительности сканера в каналах RGB. Внутри каждого канала вклады отдельных красителей суммируются, формируя итоговый отклик. Поскольку эти кривые чувствительности сканера существенно отличаются от кривых сложения цветов (color-matching functions) человеческого глаза, зафиксированные цвета не могут точно воспроизвести те, что воспринимает человек-наблюдатель. (б) Некоторые ранние способы нанесения цвета — вирурование и тонирование (tinting and toning), ручная и трафаретная раскраска (hand and stencil coloring) — могут вообще целиком выпасть из диапазона спектральной чувствительности RGB-сканеров.

Мультиспектральное сканирование решает эту проблему, фиксируя спектральные характеристики исторической цветной киноплёнки с помощью узкополосного (condensed) пучка света и создавая основу для рендеринга полученных сканов с различными источниками проекционного света, применявшимися на протяжении истории кино. Конечная цель оцифровки — максимально точно воссоздать облик фильма таким, каким он воспринимался при кинотеатральной проекции.

Не менее важно, что любая оцифровка должна следовать основным принципам этики реставрации (restoration ethics): документированию, прозрачности и обратимости (reversibility).¹⁻³ Субъективное вмешательство должно быть сведено к минимуму. Строго научно обоснованная технология — сочетающая мультиспектральное сканирование с последовательной, хорошо документированной постобработкой, сохранённой в файле метаданных в форме, читаемой человеком (human-readable), — необходима для выполнения этих этических требований. Она также даёт единственный путь к созданию цифровых элементов, устойчивых к будущим изменениям стандартов (future-proof) и способных адаптироваться к новым стандартам управления цветом и новым технологиям отображения.

Конфигурация аппаратной части мультиспектрального сканирования и управление системой

Базовые требования

Какими должны быть идеальные свойства аппаратной части сканера, разработанного специально для исторической цветной киноплёнки?

В одном из наших предыдущих исследований мы изучили взаимодействие наиболее распространённых традиционных сканеров с различными типами цветной киноплёнки.⁴ В результате был составлен каталог параметров сканирующих устройств, оптимизированных для архивной киноплёнки, с особым упором на точную передачу цвета.

Механическая компоновка: лентопротяжная система должна предотвращать физические повреждения, работая с низким натяжением и точным оптическим контролем. Необходим лентопротяжный тракт без зубчатых барабанов и штифтов (sprocketless, pinless film path), обеспечивающий бережное обращение с плёнкой при кадровой съёмке серией спектральных полос.

Освещение: система должна включать набор спектральных полос, охватывающих весь видимый диапазон, а также дополнительный инфракрасный канал для выявления царапин и пыли на бессеребряной цветной киноплёнке (silverless color film). Для воспроизведения условий кинопроекции оптический тракт должен обеспечивать коллимированное (collimated) освещение и равномерный световой поток.

Пространственное разрешение и геометрия изображения: разрешение должно быть достаточным для фиксации локальных деталей — не менее 2K для 16-мм плёнки и не менее 4K для 35-мм плёнки. Обязательно полное сканирование «от края до края» (full edge-to-edge), включающее ценную цветовую информацию и аналоговые метаданные, присутствующие в зоне перфорации. Если киноплёнка оцифрована без этой информации, впоследствии практически невозможно идентифицировать тип плёнки или проследить генеалогию (genealogy) киноэлемента.

Выходные файлы: камера должна выдавать необработанные, радиометрически линейные (radiometrically linear) монохромные данные изображения с битовой глубиной (bit depth) более 12 бит, в идеале 16-битные, с отдельной записью каждой спектральной полосы, в несжатом, хорошо документированном (то есть с публично доступной подробной спецификацией) и устойчивом формате файла, рассчитанном на долгосрочное хранение без риска технологического устаревания.

Модульность: все компоненты должны иметь модульную конструкцию, позволяющую интегрировать новые камеры, осветительные системы и оптику, обеспечивая адаптацию как к многообразию типов киноплёнки, так и к новым стандартам и технологиям.

Пользовательский интерфейс и органы управления должны вести опытного оператора сканера по строго определённым процессу и ограничивать доступные параметры научно обоснованными значениями, тем самым исключая субъективное вмешательство.

Традиционные киносканеры лишь частично отвечают этим требованиям. Большинство из них плохо приспособлены для работы с хрупким состоянием архивной киноплёнки. Но самое главное — точная передача цвета исторической киноплёнки остаётся наиболее игнорируемым аспектом их технологии.

В поисках подлинности цвета

Киноплёнка — по своей природе недолговечный (ephemeral) носитель

Киноэлементы (film elements) непрерывно изменяются на протяжении своего существования — деградация, распад эмульсии, выцветание, усадка и повреждения, такие как царапины, загрязнения и микроорганизмы. Каждый элемент несёт также собственную генеалогию (genealogy), зачастую слабо документированную и требующую оценки и исследования подготовленным историком кино, архивистом или куратором. Негативы, позитивы и промежуточные элементы (intermediate elements) могут сосуществовать во множестве версий. Прокатные позитивы (distribution positives), отпечатанные с оригинальных камерных негативов или промежуточных элементов, несут изначально задуманные цветовые характеристики — при условии, что они не выцвели и отпечатаны на предусмотренной плёнке в момент своего изготовления. Оригинальные камерные цветные негативы, напротив, дают наивысшее пространственное разрешение и динамический диапазон, но лишены важнейшей информации, необходимой для воспроизведения подлинной эстетики фильма. Это расхождение возникает потому, что а) позитивные плёнки для печати отличаются друг от друга по спектральной чувствительности, сенситометрической характеристике, динамическому диапазону и спектрам красителей — в отличие от негативов, и б) этапы постобработки, такие как цветокоррекция (color grading) и химическая обработка (development), определяют цветовую эстетику позитивной копии, отличную от эстетики любого промежуточного элемента.

Ситуация ещё сложнее, если учитывать сотни миметических (mimetic) исторических цветных процессов. Миметические цветные процессы, часто называемые «естественноцветными» (natural colors), характеризуются фотохимической цепочкой, нацеленной на максимально точное соответствие зрительному восприятию сцены. Некоторые из них используют в качестве исходного материала чёрно-белые цветоделённые негативы (black-and-white separations), а цвет наносится только на этапе изготовления прокатных копий в лаборатории — например, в процессе переноса красителя Technicolor (dye-transfer). Ранее же цвет наносился вручную на каждую отдельную чёрно-белую копию посредством вирирования, тонирования, ручной или трафаретной раскраски (tinting, toning, hand or stencil coloring), что порождало копии с чрезвычайно разнообразными цветовыми палитрами.

Цветообразующие красители и пигменты, встроенные в эмульсионные слои позитивной плёнки, не всегда точно согласуются со сложными цвето-физическими свойствами соответствующего негативного оригинала. Они порождают побочные поглощения (side absorptions), препятствующие идеальному колориметрическому воспроизведению. Эффекты взаимодействия слоёв (inter-image effects) в киноплёнке дополнительно, хотя и в меньшей степени, усиливают её нелинейный отклик.⁵ Из-за этой нелинейной и зачастую произвольной зависимости — особенно в нехромогенных двух- и трёхцветных процессах и в хромогенной плёнке до 1950-х годов — каждая цветная киноплёнка обладает собственными особенностями, которые мы называем её материальной эстетикой (material aesthetics). Даже две прокатные копии, изготовленные одним и тем же способом, могут выглядеть заметно по-разному, поскольку на итоговый результат влияет множество факторов в цепочке постобработки.

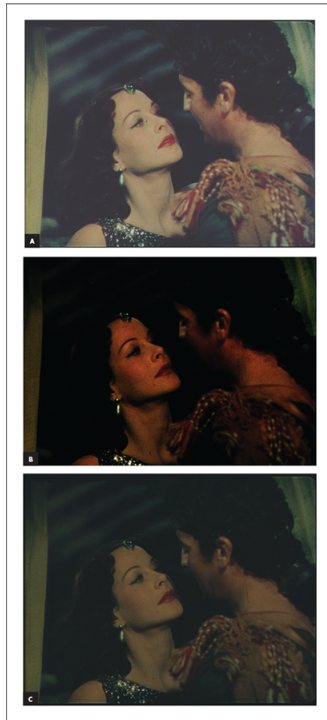


РИС. 2 (a–c): сравнение трёх основных профессиональных киносканеров: сканеры дают разные результаты без документирования своих оптических свойств и фирменной (proprietary) обработки изображения. Итог также в значительной мере зависит от квалификации и решений оператора сканера. RGB-сканы отпечатка Technicolor № IV, изготовленного методом переноса красителя (dye transfer), с трейлера фильма «Самсон и Далила» (Samson And Delilah, 1949).

Поэтому продвинутая, исторически осознанная (historically conscious) технология сканирования должна отдавать приоритет фиксации цветовой информации именно прокатных копий. Однако большинство коммерческих сканеров разрабатывались для хромогенной негативной плёнки с более низкими значениями оптической плотности — до 2, и некоторые из них не способны адекватно фиксировать более высокие значения плотности прокатных позитивов, которые могут превышать 4.⁶

Если первый шаг продвинутой, этически выверенной с точки зрения реставрации (restoration-ethical) технологии сканирования должен опираться на материальные и технические свойства сканируемой исторической киноплёнки, то второй шаг должен быть сосредоточен на освещении. Необходимо учитывать спектральное распределение мощности (spectral power distribution) источников света как в самом сканере, так и в лампах аналоговых кинопроекторов, а также их оптические тракты.

Таким образом, задача перевода аналоговых цветов исторической киноплёнки в цифровую область требует учёта всех этих ключевых факторов, относящихся как к исходным киноэлементам, так и к их демонстрации на киноэкране.

Освещение — ключевой фактор

То, что зритель видит на киноэкране, — это цветной свет, определяемый взаимодействием света проектора со спектральным поглощением красителей и пигментов киноплёнки. Таким образом, освещение — решающий фактор при оцифровке.

Как уже упоминалось, большинство традиционных киносканеров используют лишь три-четыре узкие спектральные полосы, оставляя пробелы в чувствительности. В результате они не в состоянии передать вариативность спектрального отклика исторической киноплёнки. Поскольку

эти полосы жёстко заданы (hardwired) механической компоновкой сканера, они также ограничивают универсальность научно обоснованного устройства съёмки.

Более того, источники света сканеров редко документируются, а фирменная (proprietary) обработка изображения, встроенная в аппаратное и/или программное обеспечение, вносит операции по принципу «чёрного ящика» (black-box operations), из-за которых невозможно задокументировать всю цепочку управления цветом, что нарушает принципы этики реставрации (рис. 2).

Продвинутый мультиспектральный сканер охватывает весь видимый спектр, в идеале с равномерно расположенными или регулируемыми спектральными полосами, задокументированными в файле метаданных. Он поддерживает как коллимированное, так и диффузное освещение; оптический тракт освещения критически важен для определённых типов киноплёнки. Так называемое коллимированное освещение (collimated illumination) формирует направленные лучи света и тем самым воспроизводит оптическую конфигурацию проекционного света, тогда как диффузный свет (diffuse light) снижает заметность механических повреждений киноэлемента (например, царапин и загрязнений) и поэтому предпочтителен в традиционных сканерах. Как мы сообщали в более ранней публикации, оптический тракт влияет не только на локальный и общий контраст для определённых типов плёнки, но и на цветовой тон изображения из-за так называемого хроматического эффекта Каллье (chromatic Callier effect), который зависит от длины волны.⁷ Эффект Каллье влияет на цветопередачу плёнки, содержащей рассеивающие элементы, такие как металлические пигменты в тонированной плёнке или любая серебросодержащая киноплёнка (рис. 3).

На разных этапах разработки сканера мы опробовали различные варианты компоновки освещения.

В нашей первой экспериментальной конструкции (в рамках гранта ERC Proof-of-Concept VeCoScan, номер соглашения 812583) применялся линейный перестраиваемый полосовой фильтр (linear variable bandpass filter) Schott Veril S200, охватывающий спектральный диапазон от 400 до 700 нм. Этот фильтр выделял спектральные полосы с полушириной (FWHM) около 18 нм из излучения плазменной лампы (Light Emitting Plasma, источник HPLS345 High-Power Plasma Light Source и 5-мм жидкостный световод, Liquid Light Guide). Сдвигая фильтр через узкую щель перед этим широкополосным плазменным источником, мы освещали киноматериал 25 спектральными полосами, получая соответствующую серию из 25 монохромных изображений высокого разрешения. Каждое изображение представляло одну спектральную полосу при диффузном либо коллимированном освещении. Сочетание этих методов — с использованием направленного тракта освещения, поочерёдно рассеиваемого вблизи плёнки через полупрозрачный, спектрально нейтральный диффузионный фильтр — давало 50 монохромных изображений на кадр. Хотя эта конструкция обеспечивала наилучший охват спектральных свойств при регулируемой настройке света, на практике она оказалась непригодной для реального применения. Дополнительные подвижные элементы конструкции повышали уязвимость к физическим повреждениям. Они замедляли работу, а получаемый объём данных был чрезмерным и частично избыточным — особенно с учётом частоты кадров киноплёнки от 16 до 24 кадр/с (fps).



РИС. 3: сравнение трафаретно раскрашенной и тонированной плёнки при диффузном (слева) и коллимированном (справа) освещении демонстрирует хроматический эффект Каллье. Мультиспектральный скан трафаретно раскрашенной и тонированной копии фильма «Баранья нога» (*Le Pied De Mouton*, 1907), Библиотека Конгресса США (Library of Congress), отрендеренный со спектром излучения ксенонового источника света проектора Kinoton FP30.

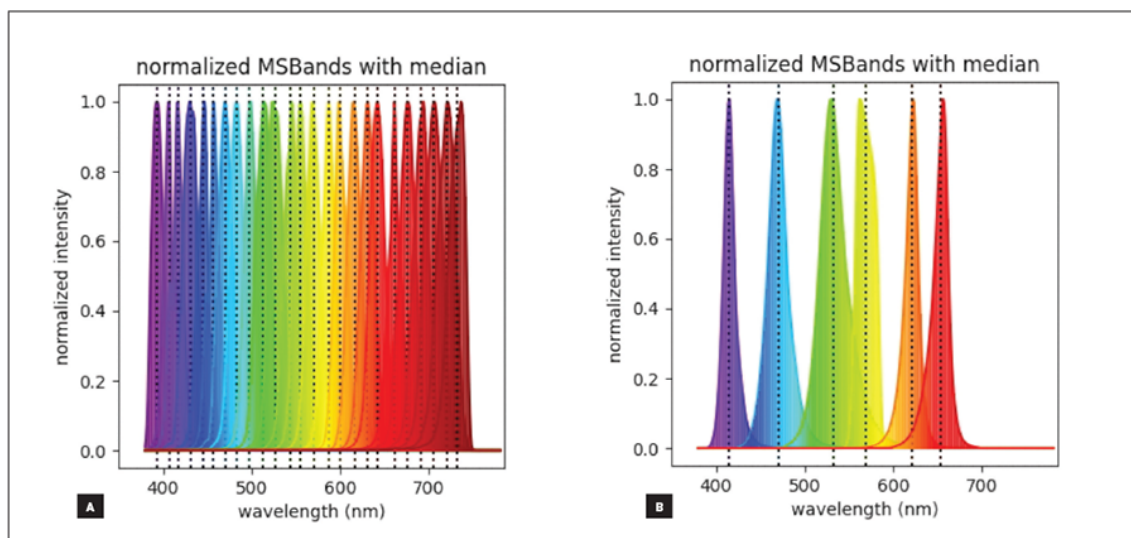


РИС. 4. (а) Спектр излучения линейного перестраиваемого фильтра и (b) нормированные значения шести светодиодов (LED) с медианой после калибровки.

Чтобы преодолеть эти ограничения, мы включили в оптическую схему набор светодиодов (LED), сократив число спектральных полос и обеспечив быстрое импульсное освещение без подвижных частей. Однако у светодиодов есть и собственные физические ограничения. По ряду причин, связанных с физикой твердотельных приборов (solid-state), два распространённых материала светодиодов — InGaN (используется для синего и зелёного) и InGaAlP (используется для красного и оранжевого) — крайне неэффективны на пиковой длине волны жёлто-зелёного диапазона около 565 нм. Поэтому производители светодиодов редко выпускают такие LED, а если они и доступны, их применение обычно непрактично из-за низкой эффективности. По этой

же причине зелёные светодиоды в видеопроекторах и жёлтые светодиоды в автомобильных указателях поворота сейчас производятся почти исключительно по той же технологии, что и белые светодиоды.

Излучательные свойства светодиодов не только ограничены — их спектр также имеет свойство меняться в зависимости от рабочей температуры. Поэтому тщательный подбор компонентов обязателен. Кроме того, коммерчески доступные светодиоды, удовлетворяющие изложенным выше требованиям, оставляют пробел в зелёно-жёлтой области спектра между 530 и 590 нм, который необходимо заполнять с помощью интерференционных фильтров. На практике для картирования (map) видимого спектра между 400 и 680 нм и получения точных цветов достаточно 6–10 равномерно расположенных узких спектральных полос. Светодиоды вспыхивают в смесительный стержень (mixing rod) для равномерного распределения света, после чего свет конденсируется и направляется через зеркальную систему для получения коллимированного освещения. Как и в предыдущей конструкции, полупрозрачный белый фильтр для диффузного освещения поочерёдно вводится в тракт вблизи плёнки.

Спектральные полосы каждого осветительного блока измеряются спектрорадиометром (spectroradiometer) Qalif Spectro, охватывающим диапазон от 380 до 780 нм с точностью по цвету $\pm 0,0015$ в координатах CIE 1931 xy и точностью по яркости $\pm 1\%$ (рис. 5 a–b). Полученные точки измерений экспортируются, преобразуются в текстовые файлы и включаются в программное обеспечение технологического процесса для документирования метаданных и визуального рендеринга. Такой подход гарантирует прозрачность, устойчивость (sustainability) и обратимость мультиспектральной обработки изображений.

Калибровка

В процессе калибровки, предшествующем каждому сеансу сканирования, время накопления сигнала (integration time) для каждой спектральной полосы определяется серией вспышек возрастающей интенсивности для нормирования спектрального отклика. Эта процедура позволяет полностью задействовать динамический диапазон сенсора, повышая отношение сигнал/шум и предотвращая пересветы (overexposure) в ярких участках изображения или точечные дефекты (pinholes), которых следует избегать согласно стандарту DIN SPEC 15587.⁶ Значения времени накопления сохраняются вместе с данными проекта и документируются в файле метаданных (рис. 4).

Процедура выравнивания поля (flat-fielding) заключается в съёмке белого и чёрного кадров без плёнки для расчёта значений светопропускания (transmittance) и компенсации неравномерности освещения в зоне формирования изображения.

Рендеринг

Если традиционные технологии оцифровки требуют обширной и трудоёмкой цветокоррекции (color grading) после сканирования, то мультиспектральное сканирование позволяет рассчитывать значения цвета, соответствующие спектральному светопропусканию сканируемой киноплёнки, с помощью выделенного конвейера рендеринга (rendering pipeline).

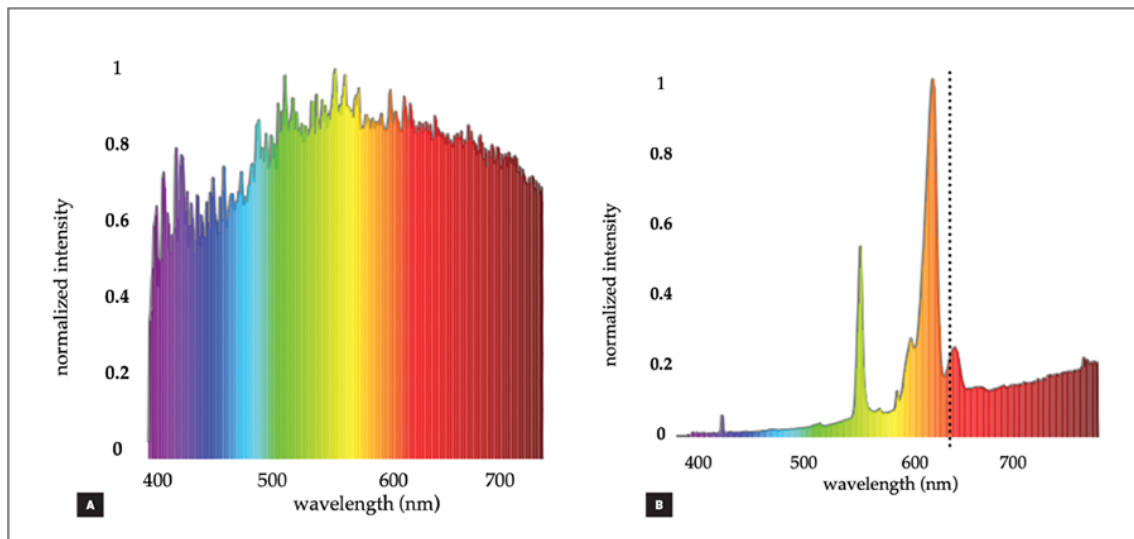


РИС. 5 (a–b). Измерение спектрального распределения мощности (spectral power distribution): а) источника света на угольной дуге высокой интенсивности (high-intensity carbon arc), усреднённого по 11 измерениям, б) источника «известкового света» (limelight) с медианой (пунктирная линия). Выполнено спектрорадиометром Qalif Spectro.

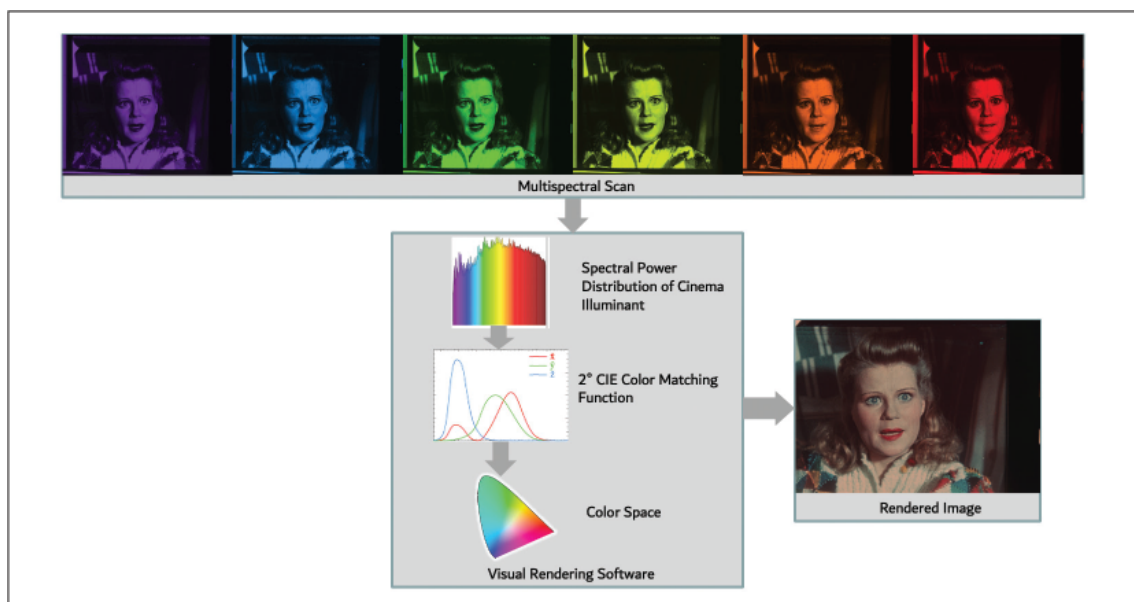


РИС. 6. Визуализация процесса мультиспектрального рендеринга: шесть монохромных изображений, соответствующих спектральным полосам (раскрашены условным цветом для наглядности), обрабатываются в программном обеспечении рендеринга для получения итогового изображения с использованием конкретного источника проекционного света и кривых сложения цветов (color matching function).

Цветокоррекция в традиционных технологиях оцифровки создаёт ряд проблем. Она дорогостояща, требует нескольких специалистов и дорогостоящих цветокоррекционных студий, и, что более критично, вносит субъективные суждения. Такая субъективность подрывает краеугольный принцип этики реставрации — прозрачность. Прозрачность требует интерсубъективно (intersubjectively) сообщаемых решений и вмешательств, применённых в процессе оцифровки/реставрации. Чаще всего решения по цветокоррекции основаны на визуальном осмотре отсканированной плёнки или эталонной копии на монтажном столе (viewing bench) перед светодиодной световой панелью. Научно строгая технология устраняет необходимость в цветокоррекции, напрямую вычисляя значения цвета из мультиспектральных сканов, как подробно описано в этом разделе.

Итоговые результаты рендеринга по-прежнему допускают кураторскую корректировку после завершения научной части технологического процесса. Прозрачность требует, чтобы эти дополнительные шаги опирались на экспертные знания и были полностью задокументированы. Такие улучшения, как повышение насыщенности, повышение резкости и прочие изменения, должны быть обозначены как ремастеринг (remastering). Заказчики могут запрашивать корректировки под современные зрительские предпочтения или для адаптации контента под платформы распространения, отличные от кинопроекции, — это распространённая практика, продиктованная экономическими соображениями. Эти дополнительные этапы обработки допустимы при условии, что неизменённые мультиспектральные необработанные сканы (raw scans) и научно выведенные варианты рендеринга сохраняются в составе комплекта обработки вместе с экспертной документацией метаданных для каждой версии.

После того как киноплёнка отсканирована мультиспектрально — покадрово, серией узкополосных источников при диффузном и/или коллимированном освещении, как описано выше, — полученные стопки монохромных изображений необходимо обработать для получения цветного изображения, соответствующего исходному фильму в том виде, в каком он проецировался на киноэкране (рис. 6). Значения цвета вычисляются из изображений светопропускания с помощью колориметрических расчётов, учитывающих источник света и кривые сложения цветов для стандартного наблюдателя CIE 1931 2°. Результаты рендеринга выводятся в устоявшихся форматах файлов изображений, таких как DPX или TIFF, в виде трёхцветных координат (tristimuli, DCI-XYZ) или значений RGB (DCI-P3, BT.709 и BT.2020), и могут быть загружены в любое основное программное обеспечение видеопостобработки и цветокоррекции.

Программное обеспечение визуального рендеринга опирается на измерения спектрального распределения мощности типичных источников света, применявшихся в кинопроекторах на протяжении истории кино. Эти измерения выполнялись спектрорадиометром Qalif Spectro, фиксировавшим отражение света от эталонной пластины Spectralon с использованием коллекции исторических проекционных источников света. В набор входят угольная дуга (высокой и низкой интенсивности),^{8,9} «известковый свет» (limelight), галогенный свет, лампа накаливания, ксенон, импульсная ртутная лампа сверхвысокого давления, металлогалогенные источники, а впоследствии набор был расширен дополнительными источниками — галогенным освещением и светодиодной световой панелью. Например, мы измерили излучение угольной дуги в Kinemathek/Lichtspiel в Берне (Швейцария), используя из их коллекции исторический 35-мм проектор Westrex Master (Century Projector Co., Ashcraft Manufacturing Co., Нью-Йорк), зафиксировав дуги как низкой, так и высокой интенсивности.¹⁰

Любой источник света можно измерить и передать в программное обеспечение рендеринга с помощью скрипта перекодирования (transcoding script) на языке Python. Это позволяет адаптировать конвейер рендеринга под любое кураторское требование. В нестандартных контекстах показа — в частности, для экспериментального кино — кураторы могут стремиться воссоздать конкретный опыт аналогового просмотра. Варианты рендеринга можно рассчитать с использованием любого из этих источников света, выбираемого исходя из исторических сведений о премьерном показе фильма, кураторских решений или предполагаемого формата распространения — кинотеатр, домашний кинотеатр, телевизор, экран компьютера или мобильное устройство.

Программное обеспечение рендеринга включает функции сложения цветов (color-matching function) для стандартного наблюдателя CIE 1931 2° (CMF).¹¹ Эти параметры должны фиксироваться и передаваться в файле метаданных в форме, читаемой человеком.

Когда спектры светопропускания дискретизированы (sampled) с шагом 5 нм или менее, CIE рекомендует вычислять трёхцветные координаты стандартным суммированием после того, как заданы источник света и наблюдатель. Для спектров более низкого разрешения — таких как получаемые при 10-полосном сканировании плёнки — предложены различные методы деконволюции (deconvolution) и интерполяции для уточнения спектрального интервала и повышения точности итоговых колориметрических значений. Однако для заметного улучшения эти подходы зачастую требуют использования цветовой мишени (color target).

Для каждого кадра, отснятого семью спектральными полосами, четырнадцать несжатых 16-битных изображений (по семь на каждую геометрию освещения) с разрешением свыше 4K дают объём данных более 420 МБ. В контексте сканирования киноплёнки, где могут создаваться десятки тысяч подобных наборов данных, оптимизация вычислительного конвейера становится необходимой. С этой целью мы опробовали более эффективный метод расчёта цвета, который вместо повышения дискретизации (upsampling) спектров светопропускания понижает дискретизацию (downsamples) функций источника света и наблюдателя, приводя их в соответствие со спектральными полосами. После выбора источника света и стандартного наблюдателя CIE рекомендует применять стандартное суммирование для вычисления трёхцветных координат. Этот подход охватывает диапазон от 380 до 780 нанометров с шагом 1 нанометр. Подробное описание расчёта цвета приведено в нашей более ранней публикации.¹²



РИС. 7 (а–с). Сравнение мультиспектральных сканов (диффузное освещение), отрендеренных с тремя разными источниками света — (а) угольная дуга высокой интенсивности, (b) угольная дуга низкой интенсивности и с) ксеноновый свет (внизу) — копии фильма «Жертвенный путь» (OPFERGANG, 1944) в процессе Agfacolor Duplichrome. Источник: коллекция Герта Кошофера (Gert Koshofer Collection).

В зависимости от предполагаемых условий просмотра — например, офис, гостиная или кинозал — пользователь может выбрать наиболее подходящую кривую тонопередачи (tonal response curve). Например, для кинопроекции обычно рекомендуется гамма 2,6, тогда как для изображений, приведённых в этой статье, использовалась гамма 2,2.

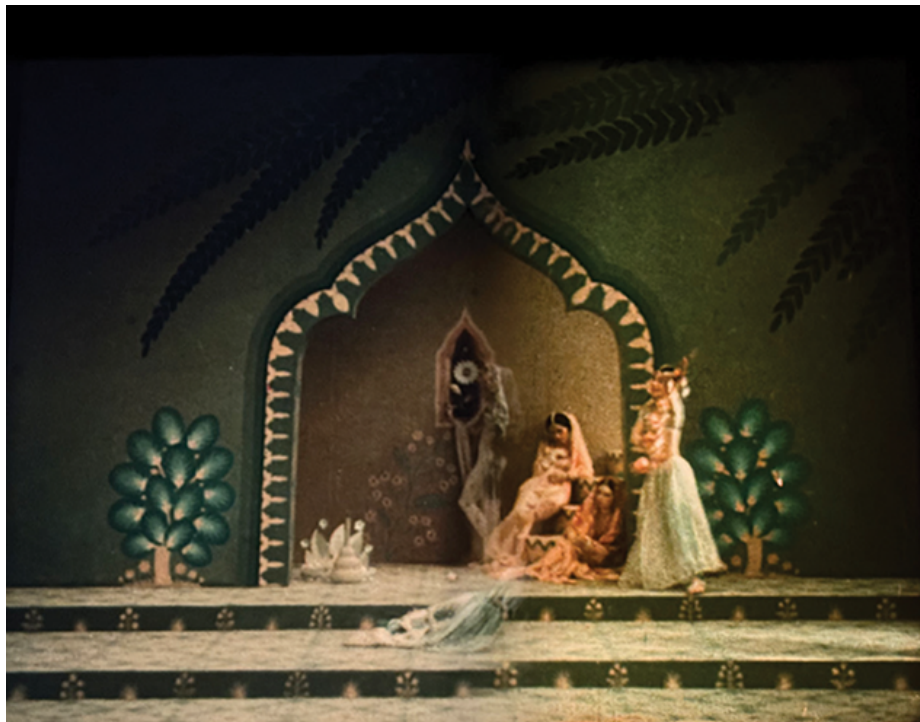


РИС. 8. Раздельная (split-screen) проекция мультиспектрального рендеринга (левая половина) и аналоговой проекции (правая половина) двухцветной нитратной плёнки Kodachrome в кинозале Dryden Theatre музея George Eastman Museum. Для сравнения свет ксенонового проектора был измерен спектрорадиометром Qalif Spectro и введён в программное обеспечение мультиспектрального рендеринга. «Флейта Кришны» (FLUTE OF KRISHNA, 1926, автор неизвестен). Источник: экспонат 1975.0007.0127 музея George Eastman Museum.

Цветные изображения на рис. 7 (а–с) и соответствующие значения рассчитаны для разных источников света.

Мы проверили результаты, проецируя мультиспектральные сканы бок о бок с аналоговой копией, чтобы подтвердить точность конвейера рендеринга (рис. 8). В одном из ранних исследований мы собрали три фокус-группы, представляющие разные области экспертизы: историков кино, кураторов и архивистов; кинотехников и колористов; а также учёных-колориметристов и физиков. Начав с упомянутых выше 25 полос, мы установили, что шесть полос дают удовлетворительный результат, оставаясь при этом управляемыми по объёму данных и времени обработки.

Перенос стиля (Style Transfer)

При оцифровке и реставрации кинофильмов часто возникает задача объединения разных исходных киноэлементов — негативов, интерпозитивов (interpositives), интернегативов (internegatives) или прокатных копий, — которые различаются по резкости, динамическому диапазону и цветопередаче. Каждый тип элемента даёт свои преимущества: камерные негативы обычно обеспечивают наивысшее качество и полноту изображения, тогда как прокатные копии точнее отражают цветовые решения, принятые ради повествовательных задач, единообразия и эстетических предпочтений.

Метод переноса эстетических характеристик из нескольких источников (Multi-sourced Aesthetic Transfer, MAT) решает эту задачу, перенося цветовую палитру эталонного элемента (часто прокатной копии) на скан более высокого качества (например, камерного негатива). Этот процесс объединяет структурную точность с исторически достоверным цветом, обеспечивая техническое качество и уважение к историческому исходному материалу.¹³

Технологический процесс включает:

- Выбор представительных пар кадров из исходного и эталонного материалов.
- Их съёмку методами высококачественного, цветоточного сканирования.
- Регистрацию и совмещение кадров для попиксельного (pixel-to-pixel) соответствия.
- Построение таблиц соответствия (look-up tables, LUT) для минимизации цветовых различий — одномерных LUT (1D LUT) для простых случаев, трёхмерных LUT (3D LUT) для более сложных цветовых преобразований.
- Применение этих LUT в программном обеспечении цветокоррекции по всей длине фильма.

В сочетании с мультиспектральным сканированием киноплёнки метод МАТ предлагает надёжную методологию гармонизации разнородных киноэлементов. Итогом становится цифровой рендеринг, уравнивающий эстетическую целостность, историческую достоверность и высокое техническое качество — сохраняющий фильмы такими, какими их предполагалось воспринимать.

Заключение

Научно строгая технология мультиспектральной оцифровки и постобработки предлагает устойчивый путь перевода исторической цветной киноплёнки в цифровую область. Этот подход не только фиксирует подробный объём спектральной цветовой информации, заложенной в киноплёнке, но и закладывает основу для нынешнего и будущего рендеринга, нацеленного на воссоздание подлинного цветового облика фильма на киноэкране. Включив измерения исторических источников проекционного света непосредственно в программное обеспечение визуального рендеринга, эта технология позволяет учитывать разнообразные условия показа. Точное кодирование полного спектра цветов киноплёнки — включая те, что выходят за пределы цветового охвата (gamut) современных технологий отображения, — обеспечивает совместимость с будущими технологическими новшествами, такими как дисплеи с расширенным числом основных цветов (multi-primary displays), более широкие цветовые охваты и другие новые стандарты. Наконец, создавая серию изображений светопропускания для каждой спектральной полосы, технология остаётся независимой от устройства (device-independent) и обеспечивает оптимальную устойчивость для долгосрочного хранения, консервации и дальнейшего доступа к материалу.

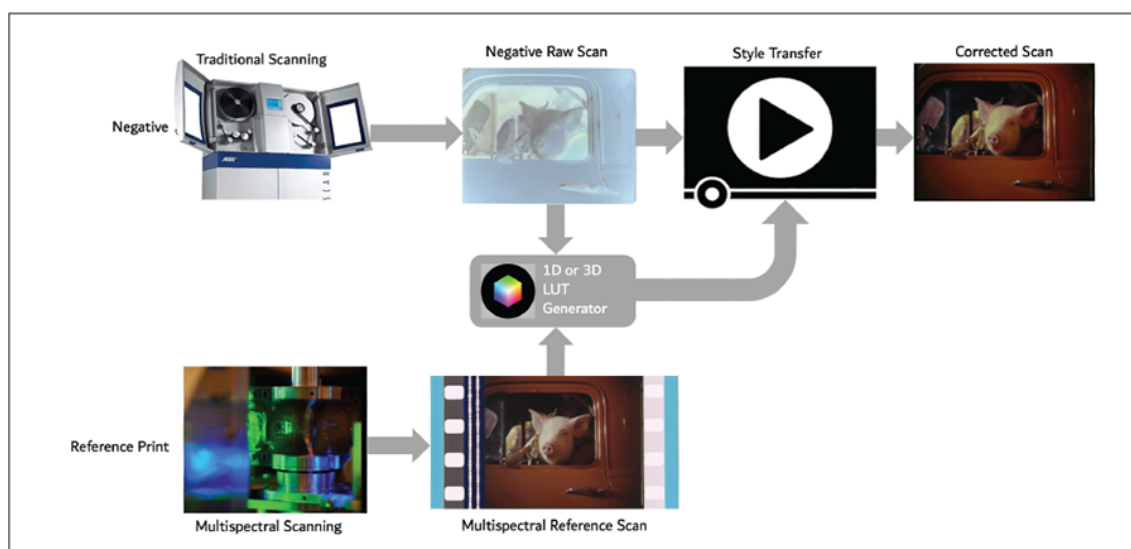


РИС. 9. Тестовый случай на примере фильма «Пи-Ви в цирке» (BIG TOP PEE-WEE, 1988): сверху слева — скан негатива, внизу слева — мультиспектральный скан эталонной прокатной копии; сверху справа — результат применения комбинированных 1D LUT; внизу справа — итог после применения 3D LUT. (Публикуется с любезного разрешения Paramount Pictures Corporation.)

К практическим сложностям применения относятся скорость обработки и объём создаваемых данных. Однако реальная практика показывает, что эти сложности можно смягчить за счёт параллельной обработки и передачи хранения данных на аутсорсинг (outsourcing). Ещё одним неожиданным препятствием стало резкое устаревание некоторых серийных (off-the-shelf) компонентов, таких как камеры или объективы.

Наш опыт работы с архивными учреждениями — включая Academy Museum of Motion Pictures, British Film Institute National Archive, George Eastman Museum и San Francisco Film Preserve — показывает, что эта продвинутая мультиспектральная технология съёмки отвечает растущему интересу к научно обоснованной и исторически точной оцифровке цветной киноплёнки. Компании-конкуренты выразили заинтересованность во внедрении мультиспектральной технологии в собственные технологические процессы и продукты.

Благодарности

Команда Scan2Screen: Лутц Гармсен (Lutz Garmsen), Дэвид Пфлюгер (David Pfluger), Мартин Вайсс (Martin Weiss), Юлиус Мушавек (Julius Muschaweck). Особая благодарность Натали Снойман (Natalie Snoyman, Scan2Screen) и Рудольфу Гшвинду (Rudolf Gschwind).

Об авторах



Барбара Флюкигер (Barbara Flueckiger) — почётный профессор (Professor emerita), основатель и генеральный директор компании Scan2Screen US, руководила многочисленными исследовательскими проектами, посвящёнными цвету киноплёнки и её сканированию. Она получила престижные гранты и награды, в числе прочих — от European Research Council и SMPTE.



Джорджо Трампи (Giorgio Trumpy) — доцент (associate professor) Норвежского университета естественных и технических наук (Norwegian University of Science and Technology), один из основателей компании Scan2Screen. Его научные интересы — спектроскопия и наука об изображениях (imaging science) применительно к культурному наследию.

Представлено на SMPTE 2025 Media Technology Summit, Пасадена, Калифорния, 16–19 октября 2025 г.
Copyright © 2026 by SMPTE.

DOI: 10.5594/JMI.2026/GWFJ9049

Дата публикации: 15 июля 2026 г.

Список литературы

1. Fédération Internationale des Archives du Film (FIAF), FIAF Code of Ethics, 3rd ed. Brussels, Belgium: FIAF, 2008.
2. C. Blot-Wellens et al., "The Digital Statement Part II: Scanning for Preservation," J. Film Preserv., 108: 19–33, Apr. 2023.
3. G. Fossati, From Grain to Pixel: The Archival Life of Film in Transition. Amsterdam, Netherlands: Amsterdam Univ. Press, 2018.
4. B. Flueckiger et al., "Investigation of Film Material–Scanner Interaction," Report, 2018.
5. R. Gschwind, "Simulating and Optimizing the Colour Reproduction of Photographic Materials," in Colour Imaging Systems. Royal Photographic Society: 4–12, 1986.
6. Deutsches Institut für Normung, "Empfehlungen zur Digitalisierung von kinematografischem Film," DIN SPEC 15587, 2019.
7. G. Trumpy et al., "Chromatic Callier Effect and Its Repercussions on the Digitization of Early Film Colors," J. Imaging Sci. Technol., 63 (1): 10506-1–10506-11, Jan. 2019.
8. H. G. MacPherson, "Suggested Classification of Carbon Arc Terminology as Applied to Pictures," Int. Projectionist, 17 (8): 18, Aug. 1942.
9. Anonymous, "New A.C. Carbon Arc Offers H.I. Light," Int. Projectionist, 5: 10–11, 1933.
10. D. Pfluger, "Spectra of Projection Light Sources Used for Analogue Cinema Projection," Report, 2023.
11. CIE, Colorimetry—Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers, 2019.
12. G. Trumpy et al., "A Multispectral Design for a New Generation of Film Scanners", in Proc. SPIE 11784, Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VIII, 117840Z: 8 July 2021.
13. G. Trumpy et al., "Style Transfer in Advanced Film Digitization and Rendering Workflows," Research Culture and Science Books. Gruppo del Colore, Associazione Italiana Colore: 137–143, 2025.