

А. Е. Шадрин

**ВОСПИТАНИЕ ПО ДОКТОРУ
МАРГУЛИСУ: РАБОТА НАД
ОШИБКАМИ**

(ВТОРАЯ РЕДАКЦИЯ)

Санкт-Петербург, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Поводом к написанию данной статьи послужила ситуация, сложившаяся сегодня в индустрии изображений, в частности в ее полиграфическом секторе: несмотря на воодушевляющие успехи технологий цветовоспроизведения, бурное развитие вычислительной техники и, главное, серьезный прогресс в науке, именуемой «наука об изображениях и их визуализации» («image & imaging science»), концептуальный базис нашей отрасли по-прежнему зиждется на принципах и стереотипах, унаследованных из того периода истории полиграфии и фотографии, когда достижение требуемого результата было искусством, если не сказать — шаманством.

Практика работы и практика общения с отечественными и зарубежными специалистами свидетельствует, что прогрессу в нашей отрасли препятствует ряд характерных концептуальных заблуждений, собрать которые воедино для последующего обсуждения и разбора — очень непростая задача.

Однако если взять за основу поиска «рецептурные справочники» по цветокоррекции, созданные очень талантливым, известным во всем мире и очень популярным в России автором Дэном Маргулисом, то, пройдя по абзацам теоретического обоснования предлагаемых им приемов, можно легко собрать список ошибочных концептуальных положений, доминирующих в отрасли и формирующих при этом в сознании специалистов (особенно начинающих) крепкие понятийные блоки, которые сильно тормозят, а порой и останавливают профессиональный рост. Возьмем за основу пособие «Photoshop LAB Color. Загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве», а также бестселлер «Photoshop для профессионалов. Классическое руководство по цветокоррекции» и разберем те тезисы, что точнее всего отражают доминирующие, но ошибочные умонастроения в сегодняшней индустрии изображений.

ТЕЗИС 1:

«На фоне монотонного окрестного пейзажа эти розовые и зеленые тона кажутся яркими словно пламя. Люди часами стоят словно замороженные, созерцая эту картину. Они видят тонкие, едва различимые оттенки, каких не может запечатлеть фотокамера, и в их воображении возникают яркие цвета, о существовании которых камера и не подозревает. Оставим в стороне философский вопрос о том, каковы эти цвета в реальности — тусклые, какими их зафиксировала камера <...>, или яркие, какими их делает зрительная система человека с ее неиссякаемым творческим потенциалом».

<...>

«Камера лишена способности к распознаванию одновременного контраста, которая свойственна человеку. Мы свободно различаем множество цветов, примыкающих друг к другу. Камера — нет. Поэтому, для того чтобы эти цвета не слиплись в сплошную массу, мы вынуждены повышать крутизну кривой A».

К сожалению, «оставить в стороне философский вопрос» мы не имеем научного права, поскольку он является основополагающим в деле обработки изображений и их подготовки к тиражированию тем или иным способом.

Мы знаем, что сцена — это фрагмент реального мира, воздействующий на зрительную систему наблюдателя в данный момент времени.

Воздействующий чем? Световыми потоками, которые на языке физиологов именуется «зрительными стимулами». Памятуя о дуалистичной природе света, мы говорим, что световые потоки представляют собой потоки квантов. Те кванты из общего потока, что способны оказать воздействие на зрительную систему наблюдателя, именуется «фотонами», и сцена, соответственно, формирует т.н. *фотонную картину* или как еще говорят — *внешний оптический массив*. Фотоны отличаются друг от друга по частоте и заполняют данный участок пространства с разной, если угодно, «плотностью». Однако фотон — это фотон, частота — это частота и такому понятию, как «цвет», здесь, как видим, нет места.

Обратимся к Международному светотехническому словарю от 1987 г. (последняя редакция), в котором, в частности на русском языке, дано следующее определение цвета:

⇒ «Цвет — это свойство зрительного восприятия, сочетающее хроматические и ахроматические признаки. Данное свойство зрительного восприятия может быть описано при помощи названий хроматических цветов, таких как: желтый, оранжевый, красный, розовый, зеленый, голубой, фиолетовый и так далее, или названиями ахроматических цветов, таких как: белый, серый, черный, яркий, тусклый, светлый, темный и так далее, или же комбинацией этих названий. Примечание: воспринимаемый цвет зависит от спектрального состава цветовых стимулов, от размера, формы, структуры и площади фона цветового стимула, от состояния адаптации органа зрения наблюдателя, а также от квалификации и опыта наблюдателя и так далее».

Однако более точным мы полагаем определение цвета, данное директором Манселловской научной лаборатории по цвету Рочестерского технологического института (США) Марком Фершильдом в его фундаментальной монографии «Модели цветового восприятия»¹:

⇒ «Цвет (Color) — это атрибут зрительного ощущения, содержащий некую комбинацию хроматических и ахроматических компонентов. Этот атрибут может быть описан как по хроматическому компоненту (например: желтый, оранжевый, коричневый, красный, розовый, зеленый, синий, фиолетовый и т.д.), так и по ахроматическому (белый, серый, черный и т.д.), а также квалифицирован как яркий, тусклый, светлый, темный и т.п. или описан комбинацией перечисленных наименований».

Проще говоря, цвет — это ощущение, и очевидно, что самое понятие цвета — сугубо субъективно. Таким образом, говорить о «цветах в реальности» невозможно по определению. В сцене (или изображении сцены) нет «реальных цветов» — есть лишь потоки излучения, фотоны, энергии, иными словами — цветовые (зрительные) стимулы, но нет цвета. Цвет же существует лишь в сознании наблюдателя.

Из сказанного становится понятно, что фотокамера (плёночная или цифровая) не в состоянии «запечатлеть цвета», поскольку она не призвана к тому, чтобы, внедрившись в сознание наблюдателя, зафиксировать его ощущения.

Что же имел в виду автор, говоря о том, что камера «запечатлевает цвета»?

Камера как светочувствительный сенсор способна лишь к одному: к отклику на фотонное воздействие. Отклик проявляет себя либо тем или иным количеством активированных кристаллов серебра в фотопленке, либо тем или иным электрическим сигналом, если это камера цифровая.

Так что же фиксирует фотокамера? Из вышесказанного ясно, что фотокамера фиксирует картину световых воздействий данной сцены на зрительный аппарат человека (и тем и ограничивается). Все последующее, что происходит с пленкой или сигналами светочувствительного сенсора, — плод выполняемого нами *преобразования* информации о воздействиях в информацию о зрительных ощущениях.

Нетрудно догадаться, что камера тем лучше, чем больше ее отклики походят на отклики зрительной системы человека. Специалисты — разработчики фотопленок и цифровых фотокамер говорят, что камера должна удовлетворять т.н. *условию Лютера — Айвса*, суть которого состоит в том, что спектральные чувствительности ее сенсора должны быть идентичны спектральным чувствительностям клеток сетчатки глаза человека, либо представлять собой их линейную комбинацию.

Понятно также, что изменение отклика камеры, возникающее при изменении характера воздействия на ее сенсор, то есть при изменении характера излучения, должно быть сходным с изменением отклика зрительной системы наблюдателя при точно таком же изменении светового потока. Минимальное изменение в характере светового потока, при котором сенсор меняет отклик, называется *порогом отклика*.

Известно, что порог отклика пленочных камер много меньше, чем порог отклика зрительной системы человека: ничтожные, не фиксируемые зрительной системой изменения энергии светового потока способны вызвать на пленке изменения в конфигурации зерен активированного галоидного серебра. Поэтому можно не сомневаться в том, что отклик пленочной камеры по своей избирательности не то что не уступает, но многократно превосходит отклик зрительной системы человека. То же касается и цифровых камер: разрядность кодирования сигналов сенсора у современных камер составляет порядка 12 бит на канал, что составляет 4096 градаций сигнала по каждому каналу, и это значит, в свою очередь, что камера в состоянии зафиксировать 4096 яркостных градаций в фотонной картине сцены. При этом избирательность зрения составляет максимум 100—110 градаций на трихроматический канал (Hunt, 2004).

Из сказанного выше следует, что автор в приведенной цитате допускает три серьезных неточности:

— во-первых, в сцене нет никаких цветов — ни «реальных», ни «нереальных», и, следовательно, они не могут быть «тусклыми» или «яркими»;

— во-вторых, камера не в состоянии фиксировать цвет (поскольку цвет — это ощущение), она лишь выдает отклик на световое воздействие;

— в-третьих (главное), фотокамера способна отреагировать на гораздо большее количество изменений в фотонной картине сцены, чем зрительная система человека (а не наоборот, как утверждает автор).

Тот факт, что цифровая камера (в рамках своего динамического диапазона) фиксирует все многообразие вариаций световых потоков сцены, — исключительно важен в деле дальнейшего преобразования ее сигналов в цифровое изображение этой сцены и последующей обработки этого изображения при подготовке к печати. Действительно, мы можем быть уверены, что обладаем всей полнотой визуальной информации о сцене, (в цифровом файле), и нужно лишь умело манипулировать этой информацией, дабы изображение выглядело сообразно нашему впечатлению, оставленному этой сценой. Более того, если бы тезис автора о несостоятельности камеры как регистратора внешнего оптического массива был верен, то многие и многие приемы, описанные в обеих его книгах, оказались бы неработоспособны, тогда как на практике они весьма эффективны, в частности упомянутый нами в начале прием с увеличением крутизны А-кривой.

ТЕЗИС 2:

«По поводу LUV, LCH, xyY, HSB, XYZ и прочих пространств можно не беспокоиться <...>, поскольку Photoshop в полной мере поддерживает только три цветовых пространства: CMYK, LAB и RGB».

Все перечисленные системы, причем даже CIELAB, не являются цветовыми пространствами.

Цветовыми пространствами в строгом значении можно назвать сегодня лишь пятимерные пространства систем CIECAM97s и CIECAM02. Однако по порядку. Начнем с RGB.

RGB-пространства

Математические RGB-пространства — это т.н. *трихроматические пространства*, по трем спектральным зонам шкалирующие меру и характер *воздействия* световых потоков (цветовых стимулов) на зрительную систему наблюдателя, но не описывающие при этом цветовые ощущения (цвета), возникающие в его сознании (Hunt, 2004).

Сказанное проиллюстрирует следующий пример: на рис. 1 (а) показаны два прямоугольника, находящиеся на черном и белом фонах. Трихроматические (RGB) значения прямоугольников в файле одинаковы, однако зрительные ощущения, как видим, сильно разнятся между собой. При этом отметим, что мера и характер воздействия на зрительную систему наблюдателя световыми потоками, исходящими от этих прямоугольников, одинаковы (о чем и свидетельствует равенство их RGB-значений в исходном файле).

На рис. 1 (б) дан аналогичный пример, но с хроматическими образцами.

Сказанное об RGB-пространствах справедливо и в отношении пространств XYZ и

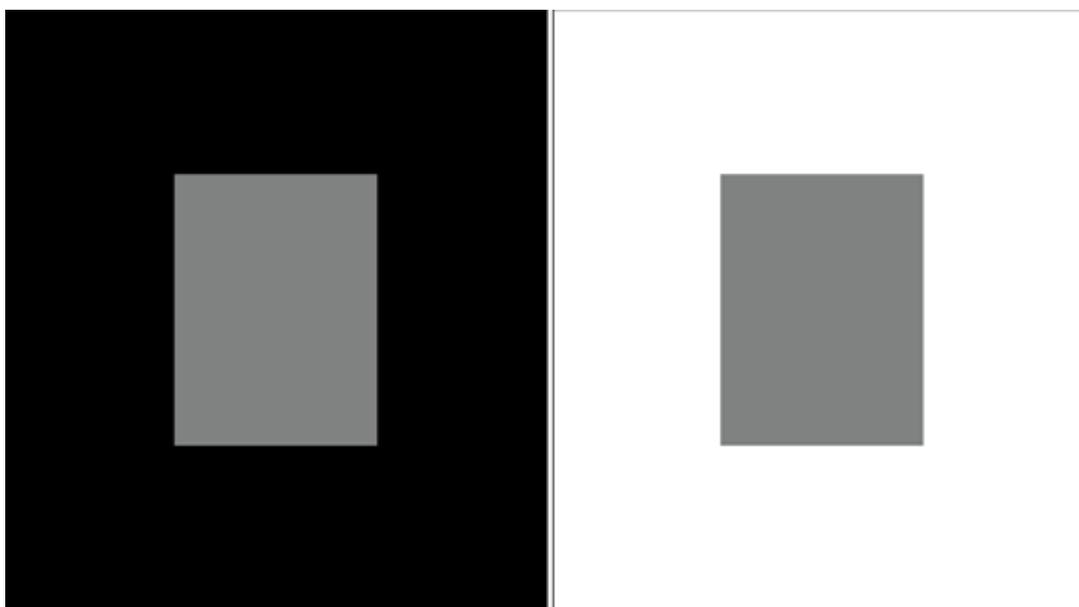


Рис. 1 (а) Серые прямоугольники, заданные в исходном файле одинаковыми RGB-значениями (128 128 128). Хорошо видно, что левый прямоугольник выглядит светлее правого, тогда как воздействие световых потоков (стимулов) на зрительную систему одинаково (о чем свидетельствует равенство RGB-значений в исходном файле).

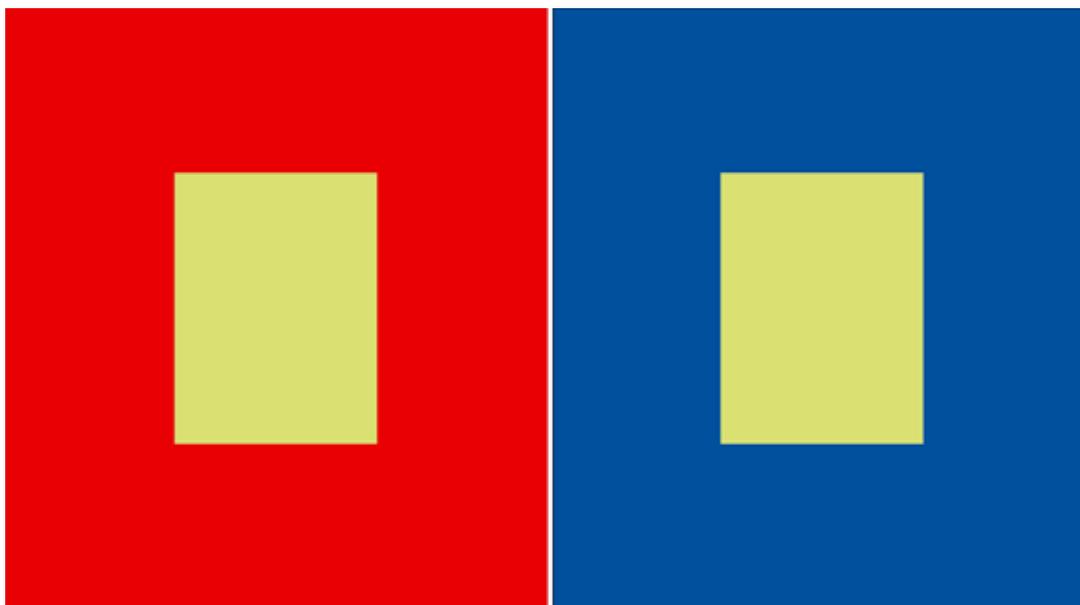


Рис. 1 (б) Хроматические образцы (на хроматических фонах), заданные в исходном файле одинаковыми комбинациями RGB-значений (R221 G145 B121). Хорошо видно, что правый прямоугольник выглядит более насыщенным, тогда как воздействие световых потоков (стимулов) на зрительную систему одинаково (о чем свидетельствует равенство комбинаций RGB-значений в исходном файле).

хуY. Идеологическое отличие последних от RGB-пространств состоит лишь в том, что т.н. первичные световые потоки (кардинальные стимулы) у пространств XYZ и хуY являются математической абстракцией и ни при каких обстоятельствах не могут быть воспроизведены искусственно (А. Френкель, А. Шадрин, 2005; Hunt, 2004).

LAB-пространство

Строго говоря, CIELAB являет собой лишь декартово представление цилиндрической координатной системы CIELCH, калькирующей идеологию манселловской цветовой системы. Последняя шкалирует цветовые ощущения по трем чувственным характеристикам: светлоте, цветовому тону и насыщенности. Полностью же цветовое ощущение (цвет) характеризуется совокупностью пяти чувственных параметров (требующих, кстати говоря, применения пятимерной координатной системы):

- субъективная яркость (brightness),
- светлота (lightness),
- цветовой тон (hue),
- полнота цвета (colorfulness),
- насыщенность (chroma).

Напомним, что с задачей шкалирования цветовых ощущений по пяти чувственным размерностям справляются лишь системы CIECAM97s и CIECAM02 (Fairchild, 2004; Hunt, 2004).

Однако в сферах цветокоррекции, цветовоспроизведения и прикладной спецификации цветовых ощущений человека критично значимы лишь три параметра: светло-

та, цветовой тон и насыщенность (Fairchild, 2004), что и используется программой Photoshop, прочими графическими редакторами, а также собственно идеологией ICC.

Особо важным обстоятельством является то, что сама по себе координатная система LAB представляет собой лишь шкалированные оси, которые не могут быть хорошими или плохими, успешными или неуспешными, правильными или неправильными. Понятия «качество», «эффективность» и «точность» применимы не к осям, а к способам расчета LAB-координат в этих осях.

Лучшими на сегодняшний день являются алгоритмы расчета LAB-значений, предлагаемые системой CIECAM97s и ее последним обновлением CIECAM02.

К великому сожалению, даже в пакете Adobe CS3 по сей день применяется устаревший и неточный алгоритм расчета LAB-значений, позиционированный CIE еще в 1976 г. (Fairchild, 2004). Более того, в недавно вышедшей версии Photoshop CS4 используются те же самые формулы и никакого прогресса по данной позиции не отмечено. О недостатках системы CIELAB образца 1976 г. подробно рассказано в уже упоминавшейся монографии Марка Фершильда «Модели цветового восприятия».

Таким образом, претензии Дэна Маргулиса к LAB-пространству, озвученные им в монографии «Photoshop для профессионалов. Классическое руководство по цветокоррекции» (далее «Photoshop для профессионалов»), следует предъявить не к идеологии LAB, а к несовершенному алгоритму расчета LAB-значений и, следовательно, недобротности механизма управления ими в Photoshop.

Однако нельзя не сказать о том, что внедрение алгоритмов CIECAM в работу графических редакторов усложнит ситуацию: прежде чем приступать к манипулированию рычагами коррекции, пользователь будет вынужден указать предполагаемые параметры просмотра конечного изображения, в частности: цветность и интенсивность освещения, фон изображения, предполагаемый характер адаптации потенциального наблюдателя (полная или неполная) и т.п., что потребует от оператора серьезной теоретической подготовки.

СМΥК-пространство

Как было показано во множестве фундаментальных работ, посвященных цветовоспроизведению, четырехмерное СМΥК-пространство представляет собой математическое пространство аппаратных сигналов того или иного печатающего устройства, но никак не пространство цветное.

СМΥК-комбинации, заложенные в файл изображения, не являются цветовыми координатами, в чем легко убедиться, проведя несложный эксперимент: открыть в графическом редакторе файл СМΥК-изображения (лучше залить пустой холст некоей произвольной СМΥК-комбинацией), дать команду «Assign profile», а затем последовательно выбирать из списка разные СМΥК-профайлы. Станет очевидно, что тональный и хроматический балансы изображения меняются, и подчас радикально, но при этом СМΥК-комбинации по каждому пикселу остаются неизменными. Действительно, так и должно быть, поскольку разные технологические процессы используют СМΥК-колоранты с разными спектральными и колориметрическими свойствами. К примеру, колористика yellow-красителя, позиционированного SWOP-стандартом, сильно отлична от таковой у стандарта ISO 12647-2. То же касается и прочих красок триады. Пример предлагаемого эксперимента показан на рис. 2.

Впрочем, все сказанное выше является сегодня уже прописной истиной, очевидной

большинству дизайнеров, цветокорректоров, препресс-инженеров и печатников (но при этом, как показывает практика, далеко не всем заказчикам и менеджерам).

Однако если специалисты по допечатной подготовке и дизайнеры готовят изображения в расчете на воспроизведение с помощью какой-то одной конкретной технологии (скажем, офсетной), одним конкретным аппаратом, то манипуляции, выполняемые «по Маргулису» инструментами СМΥК-коррекции при соответствующем СМΥК-профайле, будут вполне адекватны поставленной задаче, и сие отнюдь не противоречит здравому смыслу, принципам digital color management и ICC-установкам. В

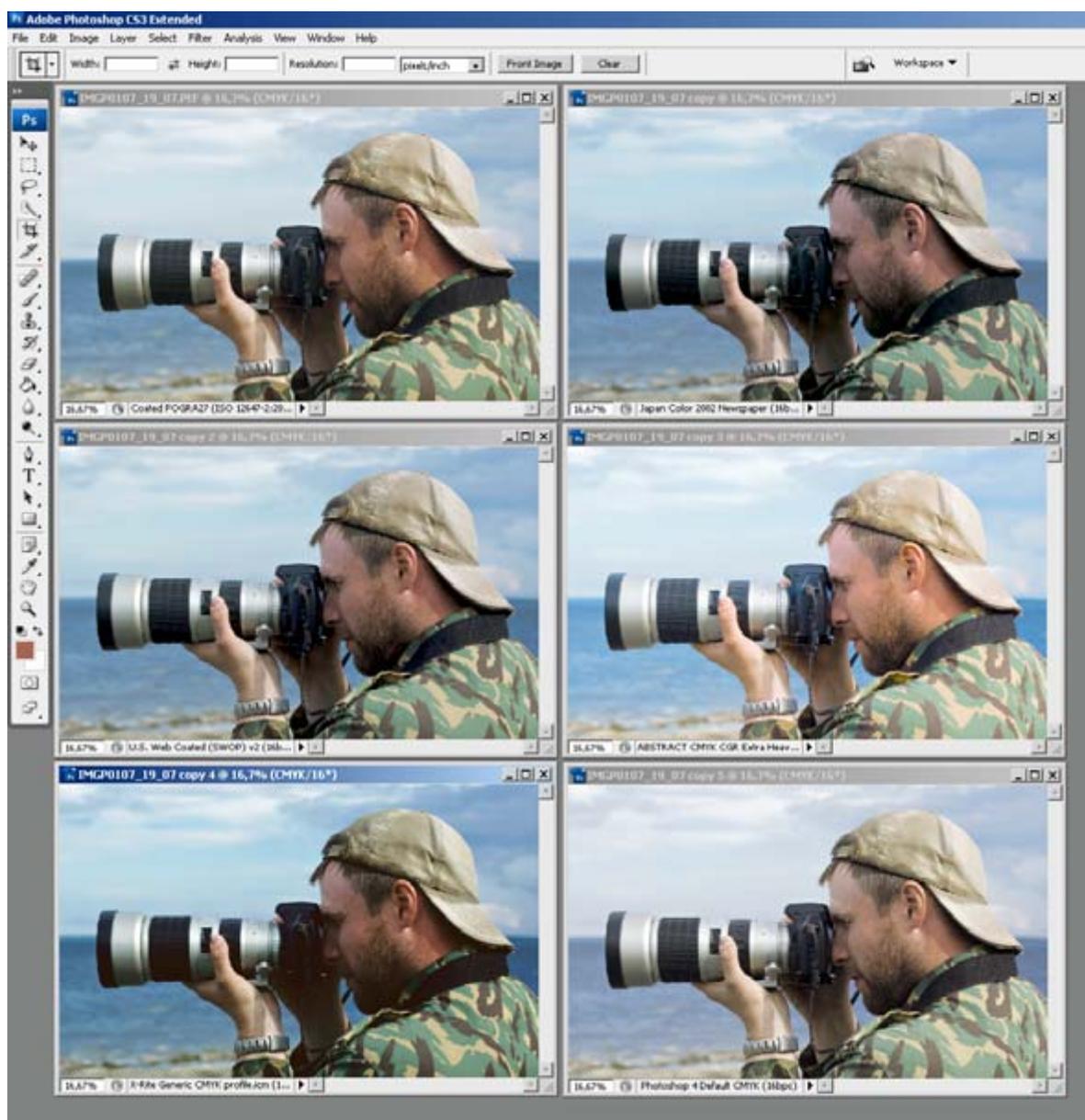


Рис. 2 Оригинальное изображение (слева сверху) и пять его копий. Во всех шести изображениях СМΥК-значения всех пикселей неизменны, однако при разных способах печати результат будет разным.

таких условиях приемы, предлагаемые в «Photoshop для профессионалов», высокоэффективны.

Теперь подробно рассмотрим, что происходит, когда корректор манипулирует аппаратными СМΥК-сигналами.

Мы помним, что при работе с СМΥК-файлами изображения экранная визуализация (на калиброванном мониторе) идет по следующей схеме (А. Френкель, А. Шадрин, 2005):

СМΥК (по профайлу печатного процесса) → LAB →
→ XYZ (по CIE-уравнениям 1976 г.) → RGB-монитора (по профайлу монитора)

Преобразование LAB → XYZ выполняется по простым аналитическим формулам CIE и возникновение ошибки в этих расчетах невозможно.

Преобразование XYZ → RGB — это простейший расчет по матрице 3×3, плюс возведение в степень. Понятно, что на этом этапе также не может быть ошибки.

Однако переход СМΥК → LAB выполняется путем интерполяции с помощью многомерной LUT-таблицы (таблицы соответствий) выбранного СМΥК-профайла: здесь чем глубже коррекция, тем больше отклоняются межузловые значения от исходной позиции и тем выше вероятность возникновения ошибок (а также их накопления по мере работы). Сказанное в особенности касается 8-битовых изображений и/или СМΥК-профайлов низкой разрядности LUT.

Иными словами, при т.н. «тяжелой» цветокоррекции (heavy color correction), выполняемой в аппаратных СМΥК-пространствах, растет риск того, что искажения, возникающие при экранной визуализации на этапе преобразования СМΥК → LAB, приведут к недостоверному отображению результата коррекции на экране, а именно: монитор «уверит» оператора, что данная СМΥК-комбинация даст результат с одними визуальными характеристиками (более того, в том же «уверит» и цифровая цветопроба), тогда как на практике они окажутся иными.

Особо остро описанная проблема проявляет себя при воспроизведении коричневых и синих элементов изображения. Последнее широко известно как проблема смещения синего в фиолет («blue turns purple problem») (рис. 3). И хотя истоки этого эффекта кроются не в интерполяциях, а в наличии т.н. *паразитных поглощений красителями* (Hunt, 2004), но ошибки интерполяций подчас усугубляют ситуацию вплоть до полной неприемлемости результатов. Отметим, что особо тяжелые ошибки СМΥК-коррекции свойственны инструменту Hue/Saturation.

Очевидно при этом, что числовой контроль СМΥК-комбинаций и апелляции к профессиональному опыту корректора (за годы работы изучившему то, что «при таких-то цифрах СМΥК на экране одно, а на печати другое») — сегодня более чем несостоятельны: корректор, опирающийся только на СМΥК-значения панели «info» и опыт работы с данным печатным аппаратом (например, печатным станком), радикально снижает свою профессиональную мобильность и рискует допустить грубейшие ошибки при подготовке к печати изображений, тиражируемых непривычным ему способом.

К сожалению, Дэн Маргулис не упоминает об опасности накопления ошибок при коррекции изображения с помощью аппаратных СМΥК-сигналов. И в свете сказанного выше ценность многих приемов, построенных на «тяжелой» СМΥК-коррекции и подробно изложенных в «Photoshop для профессионалов» становится сомнительной. (Отметим, что все это касается и коррекции, выполняемой путем манипуляций аппаратными сигналами настольных принтеров — RGB-Output-сигналами.)

Однако же, будет ошибочно утверждать, что аппаратные СМΥК-пространства не

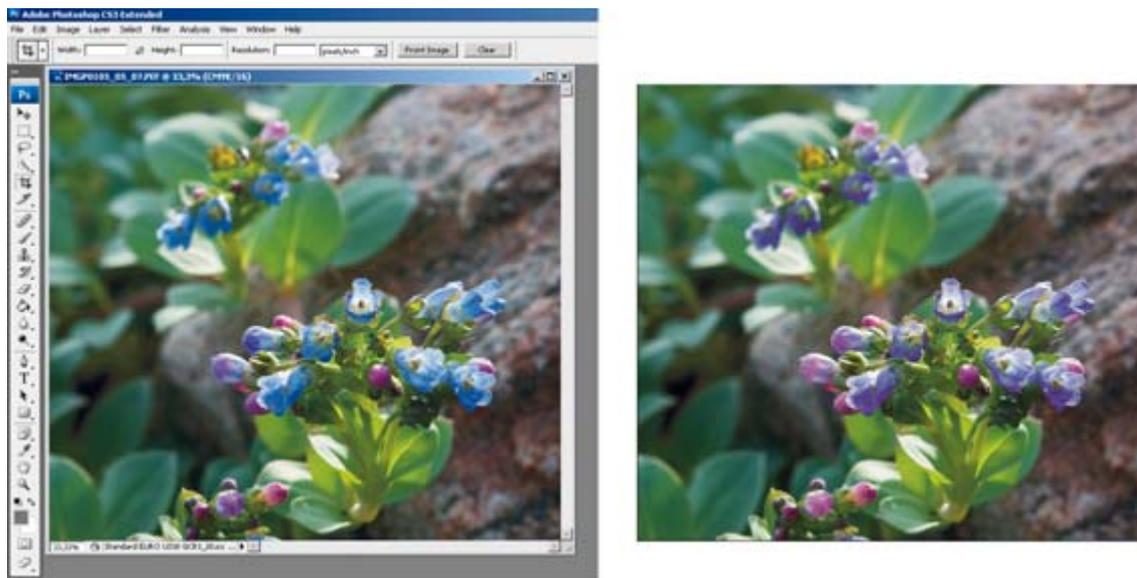


Рис. 3 Имитация накопления ошибки при «тяжелой» СМΥК-коррекции на примере усугубления паразитного эффекта смещения синего в фиолет. Вверху: экранный показ откорректированного изображения (то же на цветопробе); внизу: «результат» печати.

позволяют выполнять «легкую» коррекцию изображения, например, с целью компенсации издержек его финального преобразования из пространств трихроматических (Adobe RGB, sRGB и пр.), в которых выполнялась основная («тяжелая») коррекция и которые не грешат ошибками интерполяций, поскольку строятся на сугубо аналитических и очень простых расчетах.

Плюс к тому логика «легкой» СМΥК-коррекции может быть с успехом использована и на промежуточных стадиях работы, когда изображение выходит из трихроматического пространства в СМΥК (и обратно). К примеру: «легкая» СМΥК-коррекция может оказаться очень удобной (и даже предпочтительной) в ситуациях тонкой отладки общего хроматического баланса изображения, тонкой имитации эффектов локальной адаптации зрения за счет применения инструмента Shadows/Highlights (или обычных кривых) к black-каналу при разных вариантах GCR и т.п. Более того, квалифицированный оператор может позволить себе подобные ходы в отношении изображений, предназначенных для тиражирования неполиграфическими способами, скажем, на экранах мониторов (WEB-публикации), струйными hi-end-принтерами, фотооптическими системами и т.д. В этих случаях потерять исходный охват изображения из-за неизбежных цветовых компрессий в весьма скромный охват фактических СМΥК-устройств особенно досадно.

На помощь могут придти абстрактные СМΥК-профайлы, которые можно изготовить самостоятельно средствами «custom СМΥК» программы Photoshop, но, как показала практика, качество таких профайлов обычно невысоко. Однако же читатель может воспользоваться серией абстрактных СМΥК-профайлов, подготовленных автором данной статьи, и которые можно найти по адресу: http://shadrin.foto-one.com/Personal/Shadrin_absСМΥК.htm. Охват этих профайлов по всем направлениям радикально превышает охват традиционной офсетной печати на мелованных бумагах, и, по отзывам многих пользователей, компрессии незаметны

даже в отношении цифровых изображений «карнавальных» сцен, не говоря уже о сценах повседневных. Следует лишь особо подчеркнуть, что абстрактные СМЮК-профайлы не предназначены для изготовления электронных сепараций и могут применяться лишь в качестве промежуточных математических пространств деликатного управления цифровым изображением.

ТЕЗИС 3:

«Печать почти полностью базируется на СМЮК, хотя большинство настольных принтеров поддерживает и RGB-данные».

Давайте уточним, что же представляют собой «RGB-данные», отправляемые операционной системой компьютера на вход как настольных, так и профессиональных широкоформатных принтеров.

К сожалению, и Дэн Маргулис, и мы все стали заложниками понятийной неточности, возникшей в сфере digital imaging в 90-х годах прошлого века, когда на рынке появились первые цветные настольные печатающие устройства. Сигнал, отправляемый операционной системой на вход принтера, трехканален, равно как и трехканален сигнал, отправляемый операционной системой на вход монитора. Но собственно трихроматическим (RGB) сигнал является только в случае экранной визуализации — он дает монитору указание, какое воздействие тот должен оказать на зрение наблюдателя светом своих люминофоров, тогда как сигнал, отправляемый на вход принтера, не имеет никакого отношения ни к воздействиям, ни к трихроматическим пространствам. Однако трехканальность принтерного сигнала подтолкнула к возникновению прямой аналогии с сигналом трихроматическим, из-за чего в лексике операционных систем, более того, в лексике самого ICC ошибочно закрепилась аббревиатура «RGB».

Сигнал, отправляемый на вход настольного принтера, трехкомпонентен потому, что именно три числа нужны для обеспечения т.н. *уникальности аппаратного отклика* принтера. Поскольку только при уникальном отклике возможно построение адекватной LUT-таблицы (таблицы соответствий) и, соответственно, эффективное управление результатами печати.

В чем состоит уникальность аппаратного отклика и почему она так важна?

Вначале следует разобраться в том, что есть аппаратный отклик печатающего устройства (device response). В логике производителя принтера — это комбинация красителей, поданных на поверхность; в логике ICC — это колориметрические координаты светового потока (стимула), отраженного от участка поверхности, запечатанного согласно поступившей команде. Разумеется, в контексте цветовоспроизведения актуален второй вариант толкования аппаратного отклика, то есть толкование в логике ICC.

Итак, если на некий трехкомпонентный управляющий сигнал операционной системы принтер отвечает таким и только таким спектральным коэффициентом отражения поверхности (и, соответственно, одним конкретным цветовым стимулом), то мы говорим, что аппаратный отклик принтера уникален. В этом случае мы можем смело строить таблицу соответствий выходных трехкомпонентных сигналов операционной системы колориметрическим координатам световых потоков, отраженных от запечатанной поверхности (т.е. профайл принтера). Воспользовавшись этой таблицей, мы непременно получим требуемый результат.

Замечательным свойством настольных принтеров является то, что коль скоро они соединены с компьютером посредством обыкновенного электрического шнура (или радиоканалом), их красочный состав и взаимоотношения красок не представляют пользо-

вательского интереса. Более того, исчезает всякая необходимость в манипулировании собственно красками (что так привычно полиграфистам). Последнее обстоятельство дало возможность фирмам — производителям настольных принтеров отклоняться от требований полиграфических стандартов в любых направлениях и использовать любые красочные наборы, обеспечивая тем самым большой цветовой охват своих систем.

Полиграфические системы, в которых управляющий сигнал преобразуется из электрического (СМΥК-данные в файле) в сигнал оптический (площади растровых элементов на СМΥК-сепарациях), вынуждены придерживаться жестких стандартов, ограничивая тем самым и сами красочные наборы, и колориметрические свойства колорантов. Однако, судя по всему, не за горами то время, когда полиграфические системы будут управляться сигналом электрическим, обеспечивать уникальный аппаратный отклик, и в этом случае (рано или поздно) отпадет всякая необходимость в передаче СМΥК-данных.

Итак, «RGB-данные», отправляемые на вход принтера, не предназначены для управления изображением, но только процессом печати. Попытка манипулировать трехкомпонентными сигналами принтеров с целью цветокоррекции неизбежно приведет к эффекту накопления ошибки, описанному при разборе тезиса 2. Отметим также, что равенство управляющих сигналов по трем каналам не означает, что воспроизводимый стимул хроматически нейтральным, что создает серьезные неудобства в работе.

ТЕЗИС 4:

«Общеизвестно, что цветовой язык неточен. Если вы работаете в RGB, то 255R0G0B определяют чистый красный цвет. Однако единого мнения по поводу того, что означает “чистый красный”, не существует».

Действительно, бытовой цветовой язык, мягко говоря, неоднозначен. Но язык профессиональный — очень точен. Другое дело, что современные программы пользуются устаревшим и несовершенным языком CIELAB 1976. Плюс к тому, как отмечалось выше, цифры RGB специфицируют меру и характер воздействия светового потока на зрительную систему наблюдателя, и специфицируют очень точно. Однако знать координаты воздействия — это не значит знать координаты ощущения, координаты собственно цвета: при одном и том же воздействии на зрительный аппарат, но в разных условиях просмотра, в сознании наблюдателя могут возникнуть разные цветовые ощущения. Поэтому проблема не в неточности бытового языка (о нем мы и не вспоминаем), а в том, что RGB-значения в файле изображения не являются цветовыми координатами, но только координатами трихроматическими, то есть указывают лишь на то, что условно на зрительную систему наблюдателя каждый пиксел этого изображения оказывает такое-то *воздействие*. Иными словами, не нужно требовать от RGB-значений большей информации, чем в них заложена.

ТЕЗИС 5:

«Они сошлются на значения LAB с учетом “допуска на непопадание в цвет”, а в случае разногласий достанут спектрофотометр и замерят цвет краски».

Спектрофотометр не может «измерить цвет», поскольку измерить цвет можно только либо путем т.н. *психометрического шкалирования*, либо путем прогностического моделирования с помощью CIECAM.

Спектрофотометр измеряет не цвет, а т.н. *спектральный коэффициент отражения*

поверхности — сугубо физическое свойство тел. Однако научные знания, накопленные за период с 1926 г. по сей день, позволяют нам сделать две вещи:

1. На основе спектрального коэффициента отражения поверхности и спектрального состава падающего света рассчитать меру и характер воздействия отраженного светового потока на зрительную систему наблюдателя. Результат расчета будет представлять собой колориметрические координаты XYZ.

2. На основе полученных колориметрических координат (XYZ-значений или, как их еще называют, — трехстимульных значений) рассчитать по трем размерностям характер цветового ощущения, которое возникнет под воздействием светового потока с такими-то XYZ-координатами, причем в строго оговоренных условиях просмотра.

Требуемые расчеты выполняет программное обеспечение спектрофотометра, которое зашито либо в сам прибор, либо в компьютер, к которому этот прибор подключен.

ТЕЗИС 6:

«Первые два этапа позволили создать вариативность цвета, за что LAB и заработало свою репутацию реалистичного пространства. Третий этап добавил выразительности, четвертый резкости. Задумаемся над тем, можно ли все это проделать в RGB или CMYK. Первым двум этапам вряд ли найдется аналог».

Разумеется, можно, и аналог найдется. Действительно, цветокоррекция может выполняться двумя принципиальными способами: либо за счет управления воздействиями (т.е. путем манипуляции аппаратными данными устройств — RGB, CMYK), либо за счет управлениями собственно ощущениями (т.е. путем манипуляции LAB-значениями). И первое, и второе реализуемо в Photoshop, но исторически сложилось так, что программа делает акцент на первом варианте, т.е. на управлении воздействиями. Поэтому, безусловно, редактор позволяет пользователю найти такие способы управления RGB- или CMYK-данными, чтобы на выходе удалось достичь тех же перцепционных эффектов, что и при работе в LAB. К примеру, чтобы поменять хроматический баланс изображения, не меняя тонального (либо наоборот), нужно скопировать слой (Ctrl+J) и присвоить дубликату режим смешивания (blending mode), либо «hue» (если хотим через управление RGB-сигналами управлять цветовым тоном элементов изображения, не меняя их светлоты и насыщенности), либо «saturation» (если хотим изменить чистоту цвета, не меняя светлоту и насыщенность), либо «luminosity» (если хотим изменить тон, не меняя хроматического баланса изображения). Альтернативно: все то же можно проделать с управляющими слоями.

Однако автор справедливо замечает, что результаты нерезкого маскирования в режиме смешивания «Luminosity» уступают таковым, выполненным по оси L* в CIELAB.

ТЕЗИС 7:

«Тех, кто занимается обработкой изображений, можно разделить на два больших лагеря. Одни научились работать в RGB и панически боятся CMYK, считая его чем-то вроде высшей математики, хотя это то же самое, что RGB, только с добавленным черным каналом».

Точка зрения будто «CMYK — это RGB наоборот и с черным каналом» очень широко распространена и в корне неверна.

Дело в том, что манипуляция RGB-сигналами в цифровом файле изображения —

это процесс условного изменения интенсивностей условных воспроизводящих RGB-потоков средствами условного аддитивного трихроматического устройства, т.е. условного монитора, скажем sRGB. Работа за условным монитором предполагает то, что монитор условно находится в тусклом окружении, т.е. при полном отсутствии каких бы то ни было паразитных подсветок. Это значит, что изменение интенсивности светового потока (стимула) не приводит к изменению его относительного спектрального распределения и изменению т.н. колориметрической чистоты.

Манипуляция СМΥК-данными в файле — это процесс условного изменения концентрации красителей на поверхности. Причем либо за счет условного изменения толщины красочных слоев (системы непрерывного тона), либо (что много чаще) за счет условного изменения площади запечатки (полутонные системы). Однако и в первом и во втором случаях в идеологию манипуляции СМΥК-сигналами закладывается паразитное подмешивание белого света со всеми вытекающими из этого факта последствиями, в частности — стремительным падением насыщенности суап по мере снижения его концентрации (и наоборот).

Давайте для наглядности в отношении RGB-охвата рассудим в логике его бинаров — голубого (GB), пурпурного (RB) и желтого (RG) — и посмотрим на фигуры цветовых охватов условного монитора sRGB и условного печатного процесса, соответствующего стандарту ISO 12647-2, в проекциях на плоскости т.н. *однозначных цветовых тонов* (рис. 4).

Мы видим, что поведение GB-бинара (голубой) по мере роста его яркости/светлоты в корне отлично от поведения суап-колоранта: насыщенность GB-бинара начинает падать в самый последний момент, то есть примерно на уровне L^*90 , тогда как падение насыщенности суап начинается с середины тонового диапазона (примерно L^*50). В первом случае падение насыщенности объясняется особенностями физиологии зрительного восприятия; во втором — двумя причинами: паразитным поглощением суап-красителями в длинноволновом («красном») конце спектра (Hunt, 2004), не позволяющим достичь высокой фотометрической яркости, и подмешиванием белого света, резко снижающим колориметрическую чистоту суап-красителя. Падение насыщенности пурпурной и желтой точек у обоих охватов более или менее сходно, но эксцентричное поведение суап наглядно демонстрирует ошибочность расхожей «теоретической» формулы «СМΥ — это RGB наоборот».

Таким образом, аналитическое (формульное) описание процессов, происходящих при условном (цифровом) манипулировании концентрациями красителей на поверхности (СМΥК-данные), принципиально отличается от простейших уравнений RGB-пространств.

Только при том условии, что в СМΥК-системе используются условно-идеальные, т.н. *блок-красители*, лишенные паразитных поглощений, удастся теоретически уравнять формы RGB- и СМΥК-охватов (Hunt, 2004).

Однако такие построения не имеют никакой практической ценности и в работе графических редакторов не используются.

Процессы, происходящие в реальности при запечатке поверхностей красками, были аналитически описаны немецким исследователем Нойгебауером, а также американцами Гарди и Вурцбургом (Neugebauer, 1937; Hardy и Wurzburg, 1948; Hunt, 2004). Это описание представляет собой систему из восьми линейных уравнений (уравнения Нойгебауера), приводить которые в данной статье нет смысла, потому как формулы эти применялись в цифровых системах лишь непродолжительное время, а именно в период примерно с 1980 по 1993 гг. Современные графические редакторы, соглас-

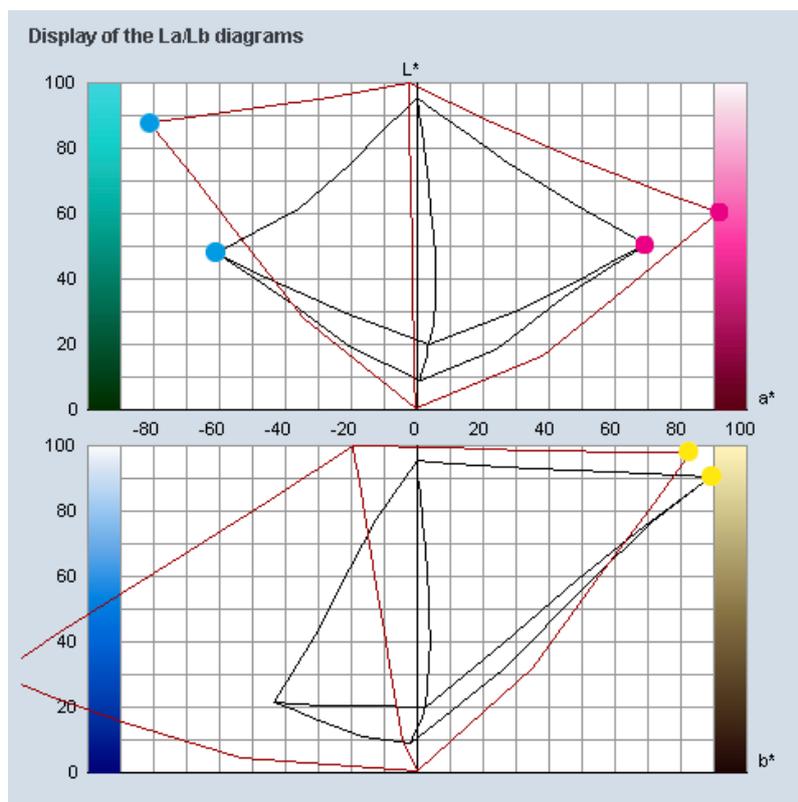


Рис. 4 Срезы по плоскостям однозначных цветовых тонов (a^* - и b^* -плоскости) цветовых охватов абстрактного аддитивного трихроматического RGB-устройства (красный контур) и фактического субтрактивного СМΥК-процесса (черный контур). Хорошо видно, что поведение суп-красителя вносит выраженную эксцентрику во взаимоотношения между RGB- и СМΥК-системами.

но ICC-договоренностям, опираются на табличные расчеты (интерполяции), выполняемые на основании профайла рабочего СМΥК-устройства. Общая схема экранного контроля, напомним, выглядит следующим образом:

СМΥК (по профайлу печатного процесса) \rightarrow LAB \rightarrow XYZ (по CIE-уравнениям 1976 г.) \rightarrow RGB-монитора (по профайлу монитора)

Такая схема позволяет почти с той же точностью, что и уравнения Нойгебауера, прогнозировать и визуализировать эффекты наложения красочных растровых точек и эффекты смешивания световых потоков, исходящих от этих точек, с белым светом, отраженным от запечатываемой поверхности (бумаги). Более того, можно полагать, что табличные расчеты в контексте фактической производственной ситуации (и по фактическому профайлу) дадут даже бóльшую точность, поскольку аналитические расчеты требуют идеальной гладкости тон-репродукционных кривых печатного процесса и стабильности пространственной конфигурации наложений растровых элементов.

Итак, мы видим, что манипуляция СМΥК-данными это отнюдь не «RGB наизнанку», но принципиально иной способ управления хроматическим балансом изображения, который, как уже было сказано при разборе тезиса 2, может быть полезен в определенных ситуациях, но не должен применяться в целях «тяжелой» коррекции.

ТЕЗИС 8:

«LAB включает еще и цвета настолько интенсивные, что они выходят за пределы нашего восприятия. Это мнимые цвета, которые не существуют в реальном мире».

Здесь автор, наряду со многими и многими специалистами, становится заложником некоторой недобросовестности компаний — производителей программного обеспечения, в частности — Adobe Systems.

Дело в том, что никаких «мнимых цветов» не может существовать по определению: вспомним, что цвет — это ощущение, и если его никогда не было в нашем сознании, следовательно, его не существует. Воистину — невозможно даже вообразить несуществующее, никогда не имевшее места в нашем жизненном опыте ощущение.

Вспомним также, что LAB — это всего лишь система декартовых (прямоугольных) координат. Природа и эволюция позаботились о том, чтобы обеспечить максимальную эффективность органа зрения как средства ориентировки в окружающем мире. Но немало не беспокоились о том, чтобы т.н. *цветовое тело человека* представляло собой куб, удобный для цветовой систематизации и спецификации. Действительно, область фактических значений в CIELAB представляет собой фигуру, показанную на рис. 5.

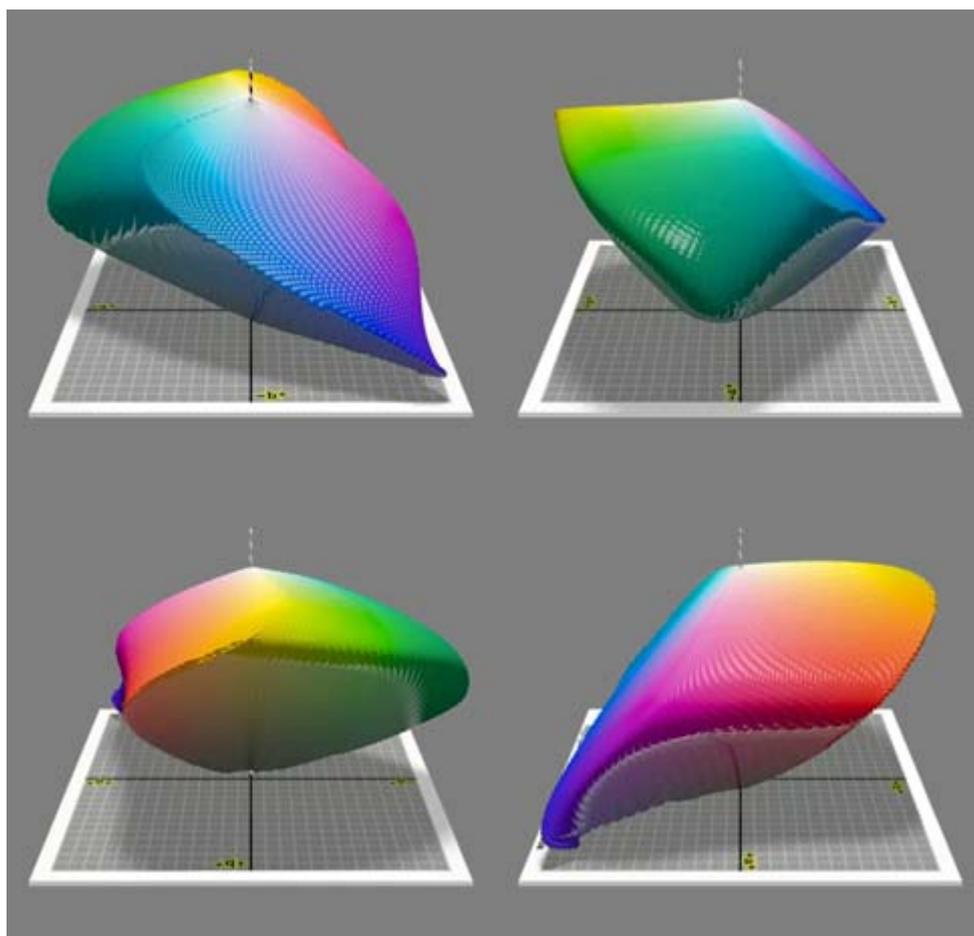


Рис. 5 Цветовое тело человека в четырех проекциях внутри LAB-пространства. Хорошо видно, что фигура едва занимает половину объема координатной системы, оставляя значения-«пустышки».

Хорошо видно, что фигура, представляющая все цветовые ощущения, которые в состоянии испытать здоровый человек при дневном свете и 1000 люкс освещенности, и являющаяся фактическим цветовым телом человека, не заполняет собой всю координатную систему и что остаются области значений-«пустышек». За этими значениями не значится ничего, кроме бесполезных цифр.

Есть все основания упрекнуть производителей графических редакторов в том, что диалоговые окна инструментов разрешают пользователю вводить эти бесполезные числа и присваивать абсурдные значения пикселям цифрового изображения. По мнению автора статьи, было бы верным, если при попытке ввести в диалог значение, скажем, L20 a110 b100, программа отвечала бы примерно следующим сообщением: «Error: human gamut limit!».

Однако же талант Маргулиса позволил употребить и эти пустые значения для организации хитроумных приемов коррекции, которыми, безусловно, можно пользоваться, но с непременным пониманием того, что в данном случае недочет, допущенный производителями программ, умело эксплуатируется в интересах оператора за счет более или менее предсказуемой математической эквилибристики.

Отметим также, что результаты приемов манипуляций значениями-«пустышками», описанных Маргулисом в «Каньоне», во многом зависят от того, как построены векторы компрессии в профайле целевого устройства (см. тезис 19). Если же эти векторы построены лучшими профайл-билдерами, то необходимость в манипуляциях значениями-«пустышками» полностью отпадает.

ТЕЗИС 9:

«Канал L прост для понимания: его можно представить, как черно-белую версию цветного изображения. Правда, из-за некоторых технических особенностей он светлее, чем нормальная черно-белая версия».

Особенности, разумеется, не технические, а физиологические. Дело в том, что L-канал CIE LAB представляет равные чувственные (перцепционные) интервалы светлоты. Тогда как тоновая шкала в «нормальном» черно-белом изображении — это шкала не светлоты, а фотометрических яркостей (или оптических плотностей). Как известно, между ощущением светлоты от светового потока и его фотометрической яркостью имеет место корнекубическая зависимость, открытая Стэнли Смитом Стивенсом в 1961 г. и заложенная в уравнения CIE LAB от 1976 г. Именно поэтому, когда мы хотим превратить полноцветное изображение в контонное серое, мы должны выполнить конверсию первого по grau-профайлу в режиме Perceptual, но не «вытаскивать» последнее из канала L.

ТЕЗИС 10:

«Когда нет цвета, каналы A и B должны быть серыми, точнее — 50-процентными серыми».

Цвет есть всегда, когда есть зрительное ощущение, даже если перцепционные показатели цвета по всем размерностям, кроме светлоты, равны нулю: все визуальные ощущения, которые испытывает человек даже с глубокими аномалиями зрения, — цветовые. Следовательно, мы говорим, что, когда значения по a- и b-осям CIE LAB равны нулю — цветовое ощущение *ахроматично*. Таким образом, словом «цвет» в подобных контекстах автор называет хроматический компонент цветового ощущения.

ТЕЗИС 11:

«Невозможность получить на печати ярко-синие тона, особенно светлые, как известно, является слабым местом СМΥК».

«Светлых ярко-синих» (а вернее говорить — высоконасыщенных светлых синих) не существует в принципе, и цветовой охват субтрактивных систем, в частности офсетной печати, здесь совершенно ни при чем: даже если бы мы имели возможность использовать идеальные красители, лишённые паразитных поглощений (блок-красители), то смогли бы получить высоконасыщенный светлый голубой и высоконасыщенный пурпурный средней светлоты, но не высоконасыщенный светлый синий. Вернемся к цветовому телу человека и посмотрим на него «в профиль»: мы видим, что по мере роста светлоты насыщенность синих стремительно падает (рис. 6 слева) — это значит, что человек не испытывает высоконасыщенных светло-синих ощущений. Более того, человек не испытывает даже ненасыщенных светло-синих ощущений (рис. 6 справа).

Объясняется сей факт малой заселенностью сетчатки глаза так называемыми S-колбочками, т.е. отвечающими на коротковолновый («синий») свет, а также их малой чувствительностью (и еще рядом причин).

В самом деле, вспомним, что если краской Reflex Blue мы напечатаем градиент от 100% запечатки до 0%, то по мере осветления он превращается в фиолетовый — то есть цветовой тон градиента меняется по мере разбеливания краски. Доминирующая длина волны при этом остается неизменной. Данный феномен можно отнести (хоть и с некоторой натяжкой) к проявлению эффекта Бецольда — Брюкке (Fairchild, 2004), впервые давших научное обоснование тому, что цветовой тон стимула меняется по мере роста его фотометрической яркости.

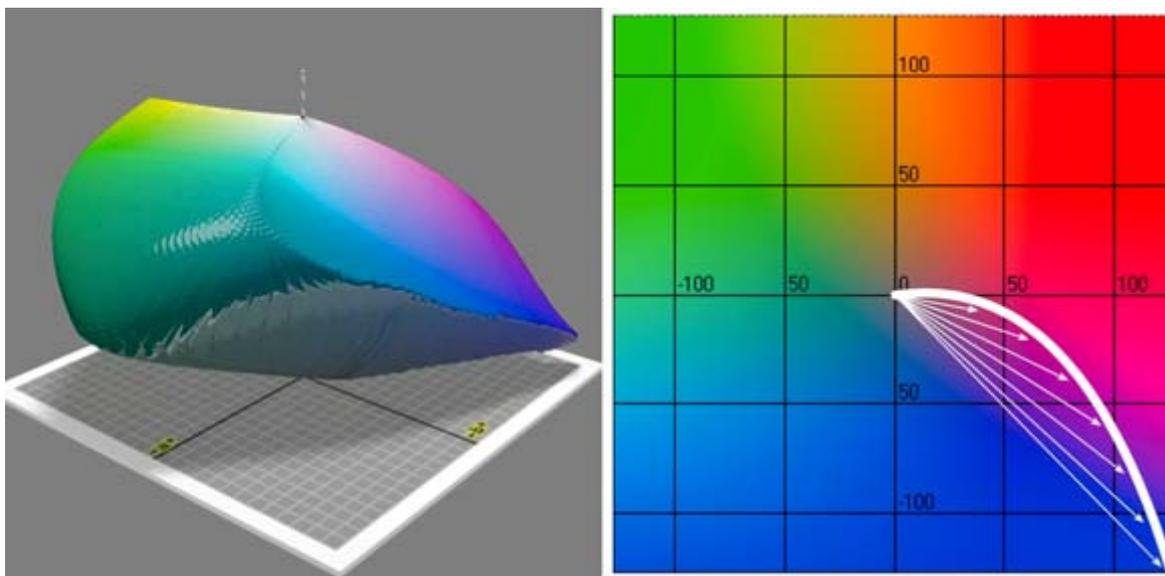


Рис. 6 Слева: цветное тело человека внутри LAB-пространства. Хорошо видно, что насыщенность синих тонов прогрессивно падает по мере роста их светлоты. Справа: приблизительный locus (в проекции на a^*b^* -плоскость) искажения цветового тона, возникающего по мере изменения светлоты исходно синих стимулов.

ТЕЗИС 12:

«Если LAB-файл содержит цвета, которые невозможно воспроизвести в целевом пространстве, то, для того, чтобы предсказать результат, вы должны обладать изрядным опытом».

Чтобы предсказать результат в данном случае, опыт не нужен. Нужно обладать адекватным (как говорят — «честным») профайлом печатного процесса, дать команду «View\Proof Setup\Custom...» и в открывшемся диалоге выбрать соответствующий профайл (либо же дать команду «Convert to profile», выбрать нужный профайл и, не нажимая «ОК», внимательно рассмотреть изображение).

ТЕЗИС 13:

«Photoshop не может создать темный голубой и заменяет его светлым».

Темного голубого не существует, и Photoshop тут ни при чем. Вернемся к цветовому телу человека (рис. 5 слева вверху; рис. 6 слева) и убедимся в том, что в соответствующей области LAB-пространства пусто.

ТЕЗИС 14:

«На печати мы не можем сделать цвета ярче, чем цвет бумаги».

Можем. Но чтобы пояснить мысль, давайте вначале разберемся с тем, что значит «ярче».

В науке об изображениях существует два вида яркости.

Яркость фотометрическая (luminance) — физический параметр, измеряемый в канделах на метр квадратный. Характеризует цветовой стимул (его интенсивность), но не цвет (не цветовое ощущение).

Яркость субъективная (brightness) — физиологический (перцепционный) параметр, характеризующий цветное ощущение.

Поднять фотометрическую яркость световых потоков, отраженных от красочного слоя, выше фотометрической яркости носителя мы не можем (если только не используем люминесцентные краски). Однако поднять субъективную яркость элемента изображения выше субъективной яркости бумаги — можем, если усилим хроматичность этого элемента (особенно заключив его в темное окружение). Таково свойство нашего зрительного восприятия.

Сказанное в первую очередь касается систем, оперирующих колорантами высокой колориметрической чистоты, то есть систем струйной печати. Кстати говоря, именно рост субъективной яркости, возникающий при росте хроматичности стимула, привел к появлению в бытовом языке такого словосочетания, как «яркие краски». Какую яркость имел в виду автор, остается неясным, но, судя по контексту, — яркость субъективную.

ТЕЗИС 15:

«Установка контраста рассмотрена в гл. 1. Она связана с настройкой тонового диапазона, но это не одно и то же».

Здесь автор затрагивает, пожалуй, один из самых непроработанных вопросов науки об изображениях: по сей день не существует единой точки зрения на то, что именно называть контрастом изображения и к какой категории отнести это понятие.

Действительно, в полиграфии и фотографии контрастом обычно называют тонопередающую характеристику, тогда как в телевидении под контрастом понимают диапазон фотометрических яркостей, присущий тому или иному дисплею. Однако этим проблема не исчерпывается. Дело в том, что наука о зрении и наука об изображениях изучают как физическое воздействие на зрительный аппарат человека, так и результат этого воздействия. Последний выражается в физиологическом отклике зрительной системы и последующем возникновении зрительного ощущения. Следовательно, обе науки вынуждены обращаться как к физике оптических явлений, так и к физиологии и психологии зрительного восприятия. Данное обстоятельство превращает науку о зрении и науку об изображениях в т.н. *междисциплинарную область знания* (Palmer, 1999): с междисциплинарной точки зрения мы и подойдем к решению вопроса о том, что считать контрастом изображения и каким он бывает.

Изображение как субстанция, несущая визуальную информацию о сцене (или другом изображении), обладает как физическими, так и перцепционными (чувственными) характеристиками.

Физические тоновые характеристики изображения с корнем «контраст»

1. Оптический (фотометрический) контраст — диапазон оптических плотностей отражающего (пропускающего) изображения, определяемый его минимальной и максимальной оптической плотностями, либо, если речь об изображении самосветящемся

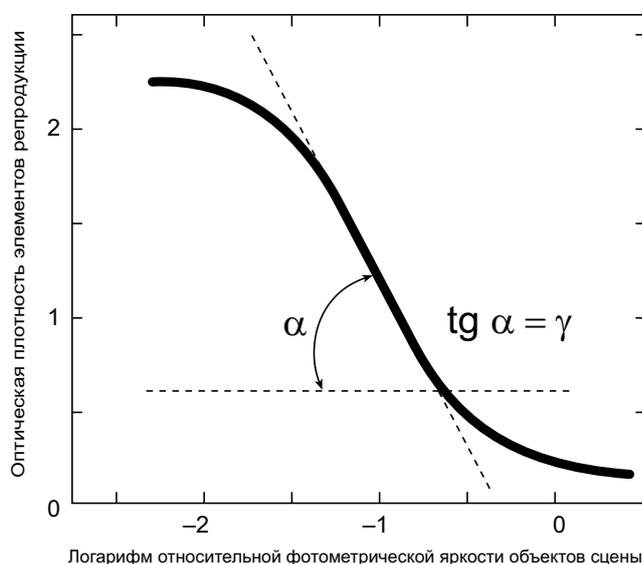


Рис. 7 Типичная характеристическая кривая отражающего отпечатка. Тангенс угла наклона линейного участка кривой характеризует такой параметр, как оптическая контрастность изображения. Важно отметить, что нелинейности в тенях и светах, формально являясь паразитными, на практике очень удачно аппроксимируют результат визуального восприятия реальных сцен (Hunt, 2004).

(воспроизведенном, скажем, экранном монитора) — логарифм отношения фотометрической яркости белой точки к фотометрической яркости черной. Оптический контраст часто называют динамическим диапазоном либо тоновым диапазоном.

2. Оптическая контрастность — наклон линейного участка характеристической кривой изображения к оси абсцисс (см. рис. 7). Тангенс этого угла обозначают греческой литерой γ (гамма) и именуют «коэффициентом оптической контрастности — гамма».

3. Дифференциальная оптическая контрастность — наклон нелинейных участков характеристической кривой, вернее, наклон касательной к ним в той или иной точке. Понятно, что тангенс этого угла именуется *дифференциальным коэффициентом контрастности (дифференциальной гамма)*. Отметим также, что дифференциальная контра-

стность во всех точках на линейном участке характеристической кривой равна контрастности.

Чувственные (перцепционные) тоновые характеристики изображения с корнем «контраст»

1. Визуальный контраст, который бывает полноценным (оптимальным) и неполноценным (Железняков, 1995). В изображениях полноценного визуального контраста распределение субъективных яркостей элементов адекватно нашим представлениям о распределении субъективных яркостей в реальных сценах. Визуальный контраст зависит от контраста оптического и становится полноценным тогда, когда оптический контраст изображения превышает $1.5D$, то есть равен 32:1 и выше (Железняков, 1995; Hunt, 2004).

2. Визуальная контрастность — чувственный темп перехода от теней изображения к его светам. Зависит от оптической контрастности изображения. Изображение с высокой визуальной контрастностью обычно называют жестким; со средней визуальной контрастностью — нормоконтрастным; с низкой — мягким. Отметим, что визуальную контрастность очень часто ошибочно называют «контрастом» даже в научной литературе.

3. Локальная визуальная контрастность — чувственный показатель проработки деталей изображения в том или ином тоновом участке (тнях, светах, средних тонах). Зависит от дифференциальной оптической контрастности.

На рис. 8 показаны четыре пары изображений, отличных друг от друга по критериям визуального контраста и визуальной контрастности: в верхнем ряду дана пара изображений равных визуальных контрастов и визуальных контрастностей; во втором ряду — пара изображений разных визуальных контрастов, но одинаковых визуальных контрастностей; в третьем ряду — пара изображений одинаковых визуальных контрастов, но разных визуальных контрастностей; внизу — пара изображений, различающихся как по визуальному контрасту, так и по визуальной контрастности.

Итак, понятно, что говоря «контраст» в контексте L-оси LAB, автор «Каньона» имел в виду визуальную контрастность изображений.

В дополнение к сказанному выше о контрастах и контрастностях мы должны отметить, что термины, несущие в себе корень «контраст», касаются не только тональных взаимоотношений между элементами изображения, но и хроматических.

Физические хроматические характеристики изображения с корнем «контраст»

1. Хроматический контраст. Определен как расстояние на диаграмме цветностей (скажем, xy) между позициями элементов с максимальной и минимальной цветностями. Цветности определяют характер *воздействия* световых потоков на зрительную систему наблюдателя, но не меру этого воздействия. В рамках данной статьи не представляется возможным описать, в чем состоит отличие между мерой воздействия и его характером, поэтому ограничимся тем, что мера воздействия влияет на выраженность, интенсивность возникающего цветового ощущения, а характер — на его цветовой тон.

2. Хроматическая контрастность — официально не определена.



Рис. 8 Верхняя пара изображений: визуальный контраст и визуальная контрастность левого (оригинал) и правого изображений одинаковы; разница состоит лишь в хроматическом составе. Вторая сверху пара: при одинаковой контрастности, т.е. темпе перехода от теней к светам, оригинал (левое изображение) обладает полноценным визуальным контрастом; правое изображение не полноконтрастно. Третья сверху пара: левое и правое изображения обладают одинаковым (полноценным) визуальным контрастом, но разной контрастностью. Нижняя пара: изображения разнятся как по контрасту (левое изображение полноконтрастно, правое — нет), так и по контрастности.

Чувственные (перцепционные) хроматические характеристики изображения с корнем «контраст»

1. Визуальный хроматический контраст, который бывает полноценным и неполноценным. В изображениях полноценного визуального хроматического контраста диапазон насыщенностей элементов адекватен нашему представлению о диапазоне насыщенностей объектов реальных сцен. Визуальный хроматический контраст зависит от хроматического контраста, но пороговое значение, определяющее ощущение полноценности визуального хроматического контраста, пока не определено, по крайней мере автору не встречалось соответствующих данных.

На рис. 9 изображения разнятся по визуальному хроматическому контрасту. Слева изображение с полноценным визуальным хроматическим контрастом; справа — с неполноценным.

2. Визуальная хроматическая контрастность — чувственный темп перехода от нейтралей и околонейтралей к высоконасыщенным элементам изображения. Продемонстрировать отличие по визуальной хроматической контрастности между двумя изображениями в рамках одного печатного издания очень трудно, поэтому мы лишь приведем следующий пример: полиграфисты с большим стажем хорошо знают, что цветные оригиналы, выполнявшиеся на слайдах Fujichrome, всегда выглядели «попугаисто» в сравнении с оригиналами, выполненными на Kodak Ektachrome; при этом и объективный и визуальный хроматические контрасты у пленок обоих типов почти одинаковые, однако темп перехода от нейтралей к высоконасыщенным у слайдов FUJI ощутимо выше, т.е. выше хроматическая контрастность.

ТЕЗИС 16:

«<...>общезвестный факт: все мы видим цвета по-разному, и поэтому у нас могут быть разные представления о том, что такое высокое качество и что значит красиво».

Здесь автор озвучивает, пожалуй, самый тяжелый миф, массово распространенный во всех секторах индустрии изображений. Однако сразу оговоримся, что тезис «у нас могут быть разные представления о том, что такое высокое качество и что значит красиво» безусловно, — верен, но не стоит забывать, что существуют объективные



Рис. 9 Пара изображений одинакового контраста, более или менее одинаковой контрастности и разных хроматических контрастов: слева (оригинал) изображение с полноценным хроматическим контрастом; справа — с неполноценным.

критерии качества изображений и критерии эти, разумеется, не инструментальные, а визуальные. Ниже мы покажем, что визуальная оценка качества изображений может быть объективной, но прежде остановимся на первой половине приведенной цитаты.

В начале прошлого века талантливые молодые британские исследователи Дж. Гилд (работавший в Английской национальной физической лаборатории) и В. Райт (Британский императорский колледж наук и технологии) провели изящный и беспрецедентный по значимости эксперимент, позволивший создать аналитическую систему классификации всех видимых излучений по критерию их воздействия на зрительную систему человека. Итогом работы стали три кривых, именуемых «трихроматическими кривыми Стандартного колориметрического наблюдателя CIE». С помощью этих кривых можно определить, каким будет отклик колбочкового аппарата зрительной системы человека на стимул данного спектрального состава при данной адаптации, — что (с некоторыми оговорками) и является характеристикой воздействия этого стимула на зрительную систему.

Критично важным обстоятельством является то, что в эксперименте участвовало всего 17 человек — 7 у Гилда и 10 у Райта. Несмотря на столь малое количество испытуемых, полученные данные оказались на удивление верны. Пройдя жесткую проверку в течение почти 80 лет, они продемонстрировали высочайшую точность результатов в самых разных отраслях: от полиграфии и фотографии, до телевидения и WEB.

Чем объяснить сей феномен? Чем объяснить то, что, вопреки распространенному заблуждению, у миллионов здоровых людей колбочковый отклик на данный цветовой стимул практически один и тот же, и, следовательно, одним и тем же является и ощущение, возникающее в их сознании (при прочих равных условиях наблюдения)?

Задумаемся над тем, для чего человеку (и другим живым существам на Земле) нужно зрение. Зрение — это инструмент получения информации об окружающем мире (посредством одного из самых лучших ее носителей — электромагнитных волн), это инструмент ориентирования в мире, инструмент выживания биологического вида. Следовательно, все особи человеческой популяции, которые реагировали на электромагнитное излучение не так, как большинство соплеменников, — давно погибли, допустив критичные поведенческие ошибки, то есть не вынеся жестокого натиска естественного отбора. Эволюция выполнила, если угодно, «калибровку» зрительной системы человека, уравнивая ее свойства между отдельными особями. Будь сие не так — мы не дошли бы в своем развитии и до кроманьонца.

Вместе с тем нетрудно догадаться, почему сегодня имеет место столь высокий процент цветковых аномалий (8% мужчин и 0,5% женщин): развитие цивилизации на протяжении нескольких тысячелетий, а также успехи медицины резко ослабили естественный эволюционный фильтр, а сегодня, безусловно, свели его действие практически к нулю. Однако это ничуть не противоречит сказанному выше о единстве цветового восприятия окружающего мира людьми со здоровым зрением.

Итак, Гилду и Райту не потребовалось большого числа испытуемых и исследователи это очень хорошо понимали. Более того, они могли ограничиться одним-двумя волонтерами со здоровым зрением, «прогнать» их через эксперимент по три-четыре раза и усреднить результат. Однако же в этом случае опыт растянулся бы на многие годы.

Таким образом, мы видим, что и отклик колбочкового аппарата на данный стимул, и возникающее в результате этого отклика цветовое ощущение у людей со здоровым зрением совершенно одинаковы. Что же разнится?

Как было показано в докладе 10-й международной конференции по цвету американского исследователя С. Фернандес (S. Fernandez, 2002), сугубо индивидуальным

является лишь то, что в английском языке звучит как «aesthetic considerations» — эстетические соображения индивида, его культурологические предпочтения. То есть разнится наше *отношение* к изображению, но не физиологический результат его восприятия. И здесь мы вплотную подходим к очевидной вещи: в роли эксперта визуальной оценки результатов цветовоспроизведения, в частности печати, может выступить только тот наблюдатель, который умеет на время визуальной сессии подавить в себе «aesthetic considerations» и, опираясь лишь на физиологические критерии, выполнить беспристрастное сравнение оригинала и его репродукции. Такого наблюдателя в науке об изображениях именуют *тренированным наблюдателем*, и его мнение можно считать объективным в биологическом контексте.

Наконец, отметим, что еще одним и очень распространенным заблуждением, озвученным в «Каньоне», которое, однако, мы не стали выносить в отдельный параграф, является тезис о том, что пожелтение глазных сред, в частности хрусталика, возникающее у курильщиков, с возрастом и пр., искажает цветовое восприятие. Ошибочность этого тезиса доказывается блестящим хантовским опытом, в котором объектив проектора прикрывали слабым желтым фильтром: в первый момент проекционное изображение желтело, но уже спустя минуту (благодаря эффекту хроматической адаптации) выглядело ощутимо лучше, а спустя две-три минуты — становилось совершенно неотличимым от исходного варианта.

Очевидно, что постепенное и легкое пожелтение хрусталика, наступающее с годами, полностью компенсируется адаптацией зрения. Показано также, что искажение цветового восприятия может возникнуть только при интенсивном прокрашивании глазных сред, к примеру в острой фазе вирусного гепатита, когда роговица, хрусталик и стекловидное тело глаза буквально пропитаны билирубином (веществом насыщенного лимонно-желтого цвета).

Итак, каковы же критерии эмоционально беспристрастной визуальной оценки качества изображений?

Здесь возможны две основных ситуации: ситуация т.н. *одновременного визуального сравнения* оригинала и репродукции и ситуация *последовательного сравнения*.

Одновременное визуальное сравнение

Простейшая ситуация, которая в полиграфии чаще всего возникает в момент приладки тиража к цветопробе (и почти никогда не возникает в фотографии). В качестве оригинала здесь выступает цветопробный отпечаток, а в качестве изображения сравнения — приладочный оттиск. Визуальные критерии оценки следующие:

— оттиск должен соответствовать оригиналу по визуальному контрасту, визуальной контрастности, визуальному хроматическому балансу, визуальной резкости, визуальной хроматической контрастности и визуальному хроматическому контрасту (критерии даны по мере убывания значимости);

— цветовой тон, светлота и насыщенность приоритетных элементов изображения должны лежать либо ниже порога визуального различия (идеальный вариант), либо минимально отличаться по цветовому тону и светлоте, тогда как допуск на возможные отличия по насыщенности существенно выше.

Последовательное визуальное сравнение

Ситуация последовательного визуального сравнения оригинала и репродукции и оценка качества последней — это радикально более сложная задача. Сложность ее со-

стоит в том, что оригинал (сцена или изображение) в момент экспертной сессии не виден, более того, его порой вообще невозможно увидеть. Поэтому эксперт, вынося суждение, опирается на т.н. *ментальный стандарт* (Hunt, 2004), сформированный в его сознании на базе жизненного опыта, опыта ежедневного, ежечасного и ежеминутного наблюдения за сценами и изображениями сцен. Вот что пишет по этому поводу экс-директор Kodak Research Laboratories профессор Роберт Хант в своей фундаментальной монографии «Цветовоспроизведение» (Hunt, 2004) (публикация перевода напечатана на весну 2009 г.):

«Можно было бы утверждать, что процесс визуальной оценки результатов цветовоспроизведения строится на ментальном сравнении восприятия репродукции с воспоминанием о цветовом восприятии оригинального объекта в момент создания его изображения. Однако же обычный человек способен судить об изображениях объектов, которых никогда не видел, и из тех времен, в которые никогда не жил. То есть, как правило, цвета репродукции оцениваются не только что не в сравнении с оригинальными объектами, но даже не в сравнении с воспоминанием о них. Тогда за счет чего мы все-таки выносим суждение?»

Судя по всему, не существует никаких альтернатив той идее, что основу оценки чаще всего составляет сравнение цветового восприятия объектов репродукции с воспоминанием о цветовом восприятии подобных объектов, то есть восприятию, когда-то имевшем место в жизненном опыте наблюдателя (Bartleson, 1959 и 1960)».

Мы видим, что ментальный визуальный стандарт людей, не являющихся экспертами в вопросах визуализации изображений, точно такой же, что и у экспертов (по крайней мере тех людей, что живут в одном социальном пространстве), но критичное отличие состоит в том, что эксперт четко осознает критерии оценки, помнит их и умеет абстрагироваться от своих культурологических и эстетических предпочтений, а главное, от посторонних факторов, влияющих на восприятие. Вновь процитируем Ханта:

«В качестве примера рассмотрим траву — весьма частый компонент цветных изображений. Когда мы пытаемся оценить, насколько точно воспроизведен стимул ее цвета, мы проводим ментальное сравнение цветового восприятия репродукции и нашего общего представления о зеленой траве. Измерения свидетельствуют о том, что трихроматические процессы плохо передают оттенки зеленого и что воспроизведенные стимулы явно более темные и менее насыщенные, чем должны быть. Почему же тогда цвет травы на изображениях оценивается как почти идеальный?»

Дело в том, что оригинальный цвет травы варьирует в весьма широком диапазоне оттенков и зависит как от ее сорта, так и от влажности почвы, освещения (его направления, цветности и интенсивности), прозрачности атмосферы, времени года и даже от цвета и размера объектов, находящихся на поляне или вокруг нее. Короче говоря, наш стереотип сравнения (воспоминание о типичном цвете травы) остается весьма неопределенным, и, следовательно, если репродукция содержит цветовой стимул из возможного диапазона стимулов, предъявляемых реальной травой, мы вполне удовлетворяемся этим. Стоит сказать также, что естественная стимульная вариативность реальных объектов, безусловно, значима, но не является при этом серьезным препятствием для относительного постоянства цветового восприятия этих объектов.

Цветовое восприятие — это одна из множества сложнейших функций нашего организма, едва постижимая разумом. На первый взгляд, мы можем говорить, что воспоминания дают нам некий сборный образ “зеленой травы”, благодаря которому наша оценка репродукции будет определенной и весьма точной. Но сие далеко от истины.

На рис. 10 приведена попытка схематичного представления факторов, наглядно демонстрирующих сложность обсуждаемого вопроса. Верхняя линия представляет процесс зрительного восприятия изображения травы: свет от изображения попадает в глаз на-

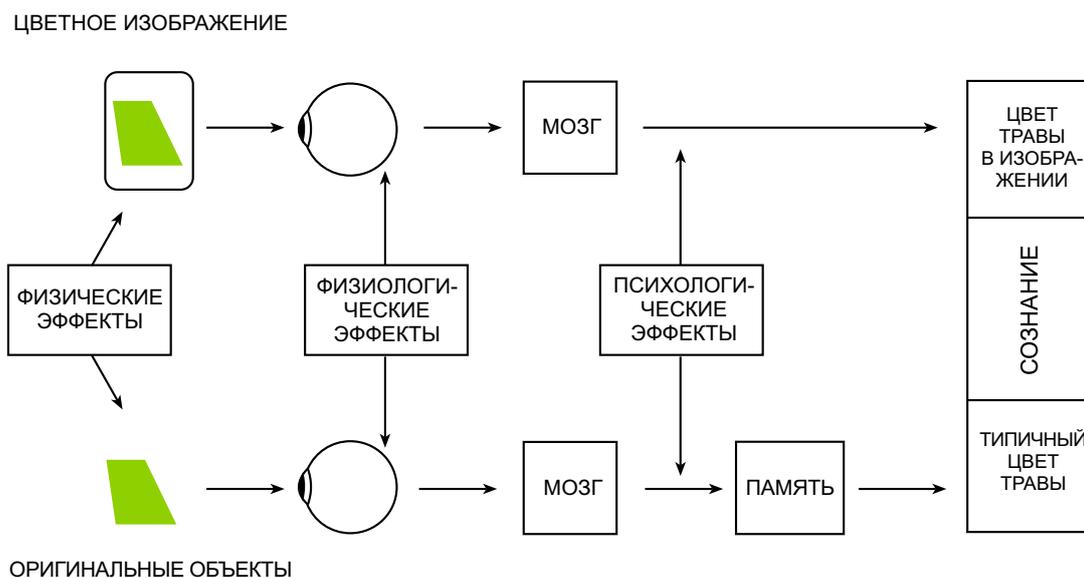


Рис. 10 Схематичное представление процессов, имеющих место при рассматривании цветовой репродукции травы (верхняя линия) и оригинальной травы (нижняя линия). Физические, физиологические и психологические эффекты разнятся в обоих случаях (а также в разных областях оригинала). Следовательно, ментальный стереотип типичного цвета травы (памятный цвет травы) весьма неопределен, в результате чего неизбежное падение полноты цвета зеленой травы на многих цветковых репродукциях часто остается незамеченным (что также относится и ко многим другим цветам).

блюдателя, в результате чего информация в виде пакета неких сообщений передается в мозг. Эти сообщения интерпретируются нашим сознанием в цветовые ощущения, согласованные с изображением травы.

Нижняя линия представляет аналогичную цепочку для реальной травы, цветовые ощущения от которой фиксируются в памяти.

Цветовое восприятие изображения травы будет зависеть от физических параметров освещения, от физиологического статуса адаптации зрения при наблюдении, а также от психологического воздействия изображения (или его части) на наблюдателя. Аналогично цветовое восприятие оригинального объекта (в данном случае — травы) зависит от физических, физиологических и психологических условий наблюдения. Условия эти не только отличны от условий, при которых рассматривается репродукция, — они еще и меняются день ото дня и от участка к участку сцены.

Из сказанного следует, что результирующее цветовое сравнение изображения травы с нашим представлением о ее обычном цвете (схематично показано в правой части рис. 10) на каждом этапе усложняется за счет посторонних воздействий. Последние не просто «затуманивают» наше впечатление о цвете объектов, но препятствуют высокоточному цветовому сравнению».

Учитывая сложности, упомянутые Хантом, эксперт при визуальном анализе изображений стремится свести влияние посторонних факторов к минимуму (мы помним, что эти условия позиционированы в стандарте ISO 3664:2000 «Условия просмотра. Полиграфия и фотография»). С другой стороны, эксперт всегда помнит, что если некий фактор вносит искажение в восприятие, то ровно такое же искажение возникает в

сознании и всех прочих наблюдателей со здоровым зрением, и поэтому экспертная визуальная оценка изображений по-прежнему остается возможной.

Итак, визуальными критериями оценки качества изображения в ситуации последовательного сравнения являются:

- полноценный визуальный контраст (см. разбор тезиса 15);
- визуальный хроматический баланс, отвечающий т.н. *условию Эванса* (отсутствие в изображении общего паразитного оттенка; те элементы изображения, ментальный стандарт на которые серый, — должны выглядеть серыми);
- визуальная контрастность, адекватная ментальному стандарту на визуальную контрастность соответствующих сцен;
- визуальная резкость, обеспечивающая комфортное восприятие детализировки изображения;
- типичная визуальная хроматическая контрастность;
- полноценный визуальный хроматический контраст;
- отсутствие артефактов (в частности, хроматических аберраций, паразитных контуров нерезкой маски, грязи, царапин и пр.);
- отсутствие пространственных (геометрических) искажений.

Параметры даны в порядке убывания значимости, но при этом стоит отметить, что такому показателю, как «отсутствие пространственных искажений» почему-то не принято уделять должного внимания (тогда как влияние этого фактора на восприятие достаточно велико). В самом деле, если подходить к вопросу с эволюционных позиций, то легко догадаться, что зрение очень чувствительно к любым отклонениям от горизонтали и вертикали, поскольку водная гладь (горизонталь) и падающие с высоты предметы (вертикаль) обладают высокой биологической значимостью. Представим себе, что мы находимся на берегу моря в шторм: мы можем наклонить голову набок почти на 90° , но при этом линия горизонта в нашем восприятии не изменит своего положения. То же можно проделать, глядя на стену здания: как бы мы ни вращали головой и даже всем телом — стена будет восприниматься нами как строго вертикальная.

Малейшие геометрические искажения в изображении, касающиеся вертикалей и горизонталей, приводят к росту т.н. фактора тревожности восприятия и снижению качества изображения при прочих равных (см. рис. 11).

Однако, несмотря на все сказанное выше, бывают ситуации, когда визуальная оценка качества изображения при последовательном сравнении невозможна или почти невозможна. Это ситуации, в которых ментальный стандарт отсутствует, как, скажем, в отношении изображения, показанного на рис. 12.

ТЕЗИС 17:

«Наверное, печатникам неудобно считать до 256, или же они настолько привыкли к процентам, что не желают переучиваться, поэтому информацию о канале L Photoshop выдает в величинах от 0 до 100».

Причина, по которой ось L системы CIELAB разбита на 100 интервалов, кроется отнюдь не в вопросах удобства и тем паче чьих-то привычках. Дело в том, что при данном статусе адаптации зрения по контрасту сцены (или изображения) человек видит лишь около сотни градаций светлоты. Как минимум 90 светлотных градаций обеспечивают равномерность шкалы светлот от черной точки до белой. Вот что пишет по этому поводу Хант (Hunt, 2004):

«Цифровые системы чаще всего оперируют 8-ю битами на каждый трихроматический

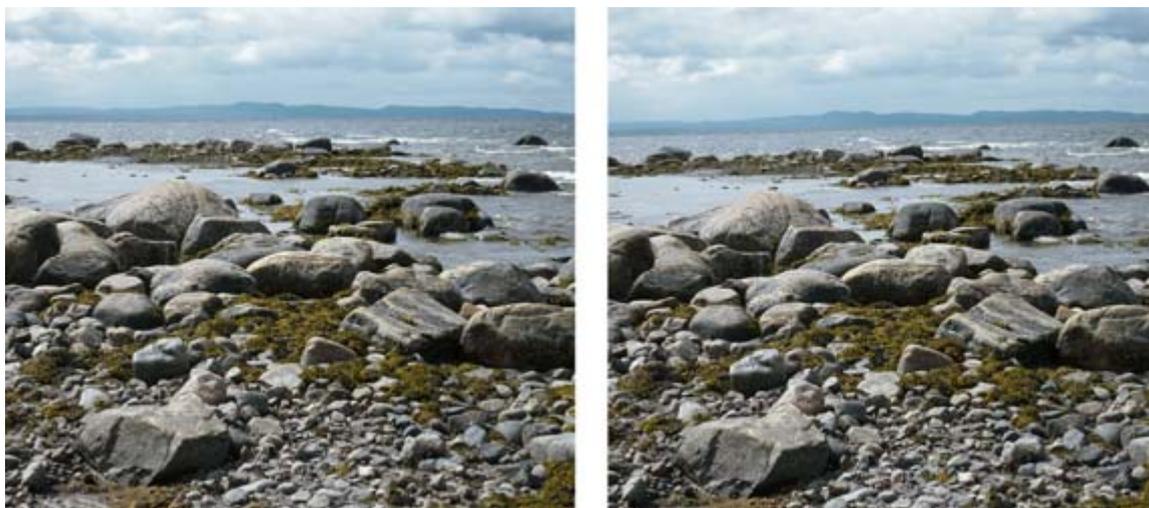


Рис. 11 Два изображения одной сцены, идентичные друг другу по всем критериям, но правое изображение имеет некоторый «завал» линии горизонта, из-за чего качество этого изображения ощутимо ниже. Обычно о таких изображениях неспециалисты говорят: «Все хорошо, но что-то тут не так...». «Не так» — это высокий фактор тревожности восприятия, вызванный наклоном горизонта.

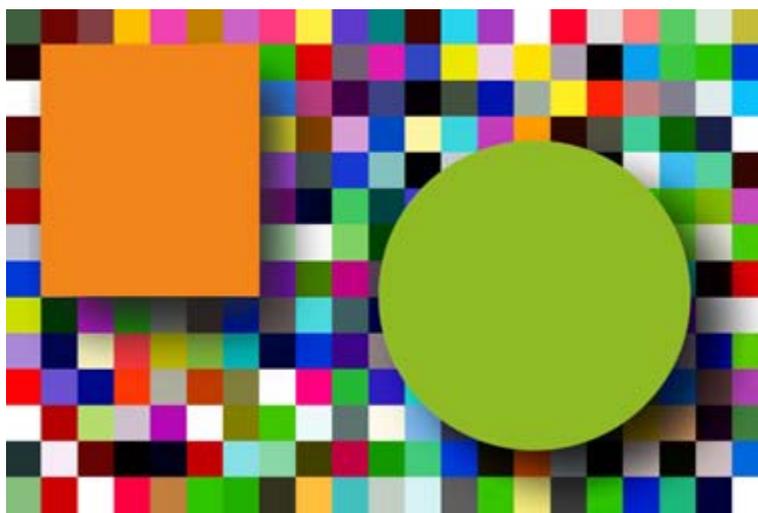


Рис. 12 Пример изображения, оценить качество которого вне одновременного сравнения с оригиналом не представляется возможным из-за отсутствия ментального стандарта. Все, что можно сказать об этом изображении, — это то, что оно полноконтрастно тонально и хроматически.

канал, давая в сумме 24 бит, и, следовательно, в целом возможны 224 (т.е. 16777216) вариантов трихроматического сигнала. Вместе с тем вопрос “каково количество стимулов, которые способно распознать зрение человека при фотопической адаптации?” по сей день остается открытым, однако, по ряду данных, число это примерно равно 10 миллионам (Judd и Wyszecki, 1975; Pointer и Attridge, 1998; McCamy, 1998; Pointer, 1998).

Чтобы 24-битовая система могла воспроизвести такое количество стимулов, ее колориметрическое пространство должно быть полностью перцепционно-равномерным. Мы

знаем, что более или менее перцепционно-равномерную серую шкалу дает L^* -функция цветовых пространств CIELAB и CIELUV. Количество рабочих L^* -значений определяется свойствами носителя изображений и условиями просмотра последних, однако максимальный диапазон обычно равен примерно 90: от примерно 10 (или чуть ниже) по черной точке (в идеальных условиях) до 100 по белой».

ТЕЗИС 18:

«С помощью команды Image>Mode>16 bits/channel можно удвоить разрядность файла, что теоретически дает 65536 возможных уровней серого <...> Я не рекомендую использовать эту команду: многократные тесты показали, что повышенная разрядность практически не влияет на качество изображения».

«За минувшие три года более десятка разных экспертов, и я в том числе, предпринимали попытки обнаружить какие-либо доказательства, свидетельствующие в пользу коррекции в 16-битном режиме. Эксперты брали самые разнообразные цветные фотографии из реальной жизни, применяли всевозможные методы обработки, пытались найти следы того, что этот режим дает лучшие результаты, чем 8-битный. Как только не измывались над бедными файлами! Но так и не обнаружили никаких преимуществ. С другой стороны, вреда от 16 бит тоже не обнаружилось».

Здесь автор озвучивает проблему, горячие споры вокруг которой не умолкают по сей день. Поэтому у нас нет иного пути, как детально разобраться в вопросе и действительно поставить в нем точку.

Начнем с того, для чего нам необходима разрядность кодирования визуальной информации, превышающая классические 8 бит на трихроматический канал. Однако прежде обратим внимание на то, что мы будем говорить не о возможном (и действительно малозаметном) повышении точности вычислений (которого мы добьемся, если изначально закодированное в 8 бит изображение переведем в 16-битное представление), а об этапе захвата яркостной информации сцены (или ее изображения), потому как только в этом контексте рассуждения о 16-битном кодировании имеют смысл.

Вновь обратимся к Ханту и продолжим цитату, начатую еще при разборе 17-го тезиса:

«Если едва заметное тональное отличие между двумя стимулами принять за единицу L^* , то минимальное количество тональных уровней, позволяющих уйти от паразитного дробления градиентов, будет равным $100 - 10 = 90$, т.е. примерно 6.5 бит. Однако когда для кодирования тональной информации используются линейные сигналы, представляющие коэффициент яркости, то, согласно корнекубическому закону Стивенса (определяющему взаимоотношения между фотометрической яркостью стимула и ощущением его светлоты), шаг в 1 единицу по L^* (к примеру, между 10 и 11) будет соответствовать шагу яркости 0.135 (модуль разности между коэффициентом яркости 1.126 и 1.261). Иными словами, диапазон коэффициентов яркости от 1.126 до 100 (то есть 98.874) должен быть представлен дискретными значениями с шагом 0.135. Следовательно, количество яркостных ступеней на диапазон в этом случае должно быть равным $98.874/0.135$, то есть — 733, что требует разрядности кодирования минимум в 9.6 бит. То есть, для того чтобы система могла воспроизвести все различимые стимулы в рамках своего охвата, необходимо 10-битное линейное кодирование на каждый трихроматический канал (в сумме 30 бит).

Если интегральная оптическая плотность оригиналов в комплекте не постоянна, то линейному кодированию потребуется еще большая разрядность. К примеру: оптическая плотность вуали слайдов (т.е. оптическая плотность их белой точки) может варьировать в пределах до 4-х крат, а у негативов до 16 крат и выше. Следовательно, для кодирования дополнительного шестнадцатикратного диапазона оптических плотностей по-

требуется еще 4 бита информации на каждый трихроматический канал, что в целом составляет $(10+4) \times 3 = 42$ бит».

Мы знаем при этом, что гамма-предыскаженное (т.е. линейное в логарифмических осях) кодирование яркостной информации позволяет уйти от высокой разрядности, оставляя привычные 8 бит на канал, но при этом не предполагается, что изображение будет подвергаться «тяжелой» обработке.

Что же означает выражение «тяжелая обработка»? Оно означает, что в изображение вносятся очень серьезные изменения, скажем, за счет селективных манипуляций кривыми, и что в результате этих изменений тон-передающие характеристики в трихроматических каналах изображения могут на каких-то участках стать нелинейными (напомним, что тон-передающая характеристика изображений на большем своем протяжении линейна в логарифмических осях — см. тезис 15).

К чему это может привести? По логике, случайно возникшее отклонение от линейности отдельных участков тон-передающей характеристики изображения должно приводить к появлению на плавных тональных переходах т.н. *паразитных контуров*, т.е. должно возникать, как говорят, «дробление» *градиентов*, их *паразитное оконтуривание*. Однако же, как верно замечает Дэн Маргулис, в подавляющем большинстве изображений такого эффекта не наблюдается, и виден он лишь на искусственных градиентах. Почему?

Ответ дает следующая цитата из Ханта:

«Как в любой оптической системе, в глазном яблоке человека модуляции интенсивности света, воздействующего на сетчатку, прогрессивно падают по мере роста пространственной частоты зрительных стимулов (см. рис. 13). Следовательно, число тональных уровней, которое требуется для ухода от паразитного оконтуривания градиентов в изображении, снижается по мере роста пространственной частоты элементов этого изображения».

Действительно, в большинстве фотореалистичных изображений элементы с плавным переходом тонов имеют малый пространственный размер и не требуют высокой разрядности кодирования яркостной информации. К примеру, изображение, показанное на рис. 14, может быть смело закодировано в 8 бит и даже самая пристрастная и «тяжелая» коррекция ему не страшна — паразитного визуального оконтуривания градиентов в элементах этого изображения не возникнет.

Однако, вопреки мнению автора «Каньона», достаточно часто встречаются изображения естественных сцен, в которых присутствует крупный и равномерно окрашенный элемент — небо. Вот здесь, если изображение это было закодировано в 8 бит, в основном и появляются паразитные контуры (рис. 15). Также бывают ситуации, когда изображения людей в равномерно окрашенной одежде воспроизводятся в большой пространственный размер, скажем, при печати наружной рекламы: здесь издержки 8-битной коррекции просто бросаются в глаза (особенно в нижней трети тонового диапазона изображения и в его тенях, где тоновая избирательность зрения особо высока). Жители крупных городов могут ежедневно наблюдать эффекты паразитного оконтуривания в уличных рекламных плакатах, в частности на лицах моделей, в складках платяев и пр.

В приведенном примере первичным изображением сцены являлось слайд-изображение, где естественная зернистость фотопленки несколько сгладила паразитный эффект. На файлах, полученных при помощи ЦФК, оконтуривание градиентов еще заметнее.

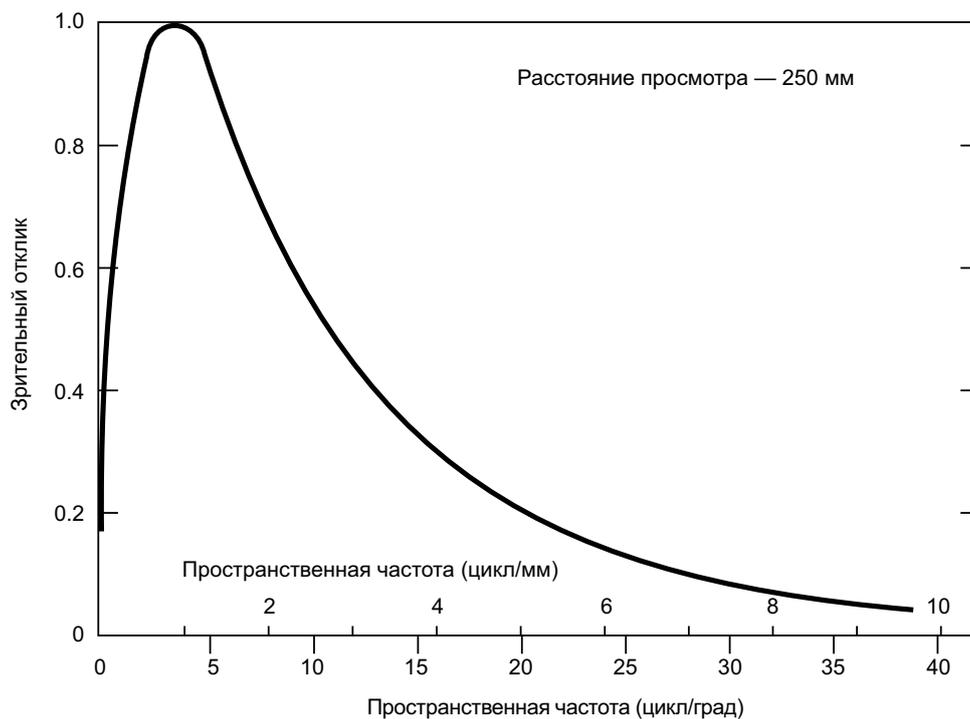


Рис. 13 Частотно-контрастная характеристика зрения человека. Хорошо видно, что пик зрительного отклика приходится на стимулы низкой пространственной частоты, т.е. крупные элементы изображений. По мере роста пространственной частоты стимулов отклик зрения падает, и, следовательно, падает величина требуемой разрядности кодирования. Данное свойство зрения активно эксплуатируется алгоритмом сжатия JPEG 2000.

Таким образом, решение, с какой разрядностью выполнять оцифровку изображений и их коррекцию, напрямую зависит от того, каким предполагается пространственный размер оттиска: если изображение готовится к печати в журнале или книге, то чаще всего паразитные контуры не будут заметны и достаточно 8-битной оцифровки; если предполагается печать крупных рекламных плакатов, выставочных фотографий и т.п., то и оцифровка и цветокоррекция в 16 битах крайне необходимы.

Однако если вычислительная мощность компьютера достаточно высока, то тактика оцифровки и обработки изображений, звучащая как «16 бит всегда, когда имеется возможность», безусловно верна (в частности, справедливым является требование издательств и типографий предоставлять в качестве электронных оригиналов RAW-файлы цифровых фотокамер).

Очевидно также, что когда изображение было оцифровано в 8 бит, то принудительное увеличение разрядности данных в файле до 16 бит на канал — практически бессмысленно (если не считать некоторого роста точности вычислений).

Примечание автора: читателю может пригодиться следующий прием, позволяющий выявить то, является ли предоставленный 16-битный файл подлинным: достаточно применить к изображению крутую кривую, а потом взглянуть на гистограмму — если гистограмма останется по-прежнему гладкой, то изображение было «честно» оцифровано с высокой разрядностью; если гистограмма превратится в «гребенку» — изображение было оцифровано в 8 бит, а потом принудительно переведено в 16. Прием полезен, в частности, при решении спорных вопросов о качестве сканирования.



Рис. 14 Типичный пейзаж, изображение которого даже при очень сильных увеличениях будет состоять из элементов малого пространственного размера, не требующих высокой разрядности кодирования визуальной информации. Оцифровка и обработка такого изображения могут смело проводиться в 8 битах.

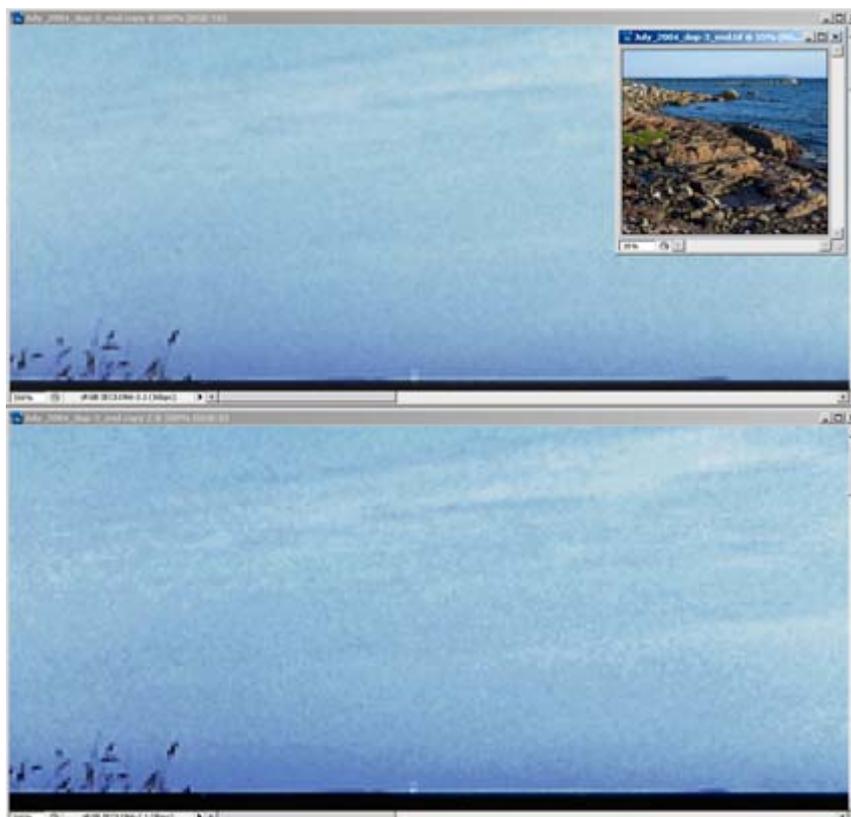


Рис. 15 Вверху: увеличенный фрагмент оригинального 16-битного изображения (в правом верхнем углу), подвергнутого «тяжелой» коррекции. Внизу: тот же фрагмент 8-битной копии оригинала, подвергнутой такой же коррекции: отчетливо виден эффект постеризации (паразитного дробления градиента).

ТЕЗИС 19:

«Научитесь решать проблемы громадного охвата LAB, и вам будет гораздо проще управляться с непечатаемыми цветами любых пространств с более скромным охватом».

«В 90-е годы считалось, что цвета, попадающие в охват, следует ослабить, чтобы преобразованные “внеохватные” цвета по сравнению с ними выглядели ярче. Этот метод, названный перцептуальным рендерингом, появился в Photoshop 6; он и стал стандартным для последующих версий.

В Photoshop CS2, который был выпущен в 2005 г., в механизм цветоделения были внесены исправления».

«Существует полдюжины разнообразных версий LAB, и одна из них использована в программе LinoColor. Называется та версия LAB(CH), и она имеет меньший цветовой охват по сравнению с тем пространством LAB, которое мы знаем и любим. Поскольку клиенты компании Linotype-Hell ориентировались в основном на СМУК, такое решение было в высшей степени целесообразным: цвета с трехзначными координатами А и В все равно не воспроизводятся на печати. А если охват LAB приблизить к охвату СМУК, все объекты обретут более широкий диапазон в каналах А и В и, следовательно, их будет удобнее корректировать».

Здесь автор поднимает очень серьезную и обширную тему гамут-мэппинга, в частности цветовых компрессий, однако в стремлении предельно упростить материал, на наш взгляд, несколько «перегибает палку», уводя тем самым читателя от существа проблемы. В самом деле, вопрос не настолько сложен для общего понимания, чтобы обходить его молчанием.

Априори ошибочным положением является то, что реализация гамут-мэппинга целиком возлагается на графический редактор, в частности Photoshop. Миссия программного модуля, отвечающего за мэппинг (СММ — Color Management Module), в графическом редакторе сегодня довольно скромна и состоит в аккуратном выполнении инструкций, заложенных в профайл целевого устройства (ICC, 2004). А вот инструкции эти, их качество и исполнение — ответственность программы профайл-билдера.

Поскольку Маргулис в основном оперирует профайлами, взятыми из стандартной поставки Photoshop, то он неизбежно сталкивается с тем, что Perceptual-таблицы этих профайлов, в частности заложенный в них механизм гамут-мэппинга, оставляют желать лучшего. Таким образом, становится понятным, что предлагаемые автором «Каньона» разнообразные трюки с цифрами-«пустышками» LAB — это попытка ручной компенсации издержек алгоритмов мэппинга, заложенных в целевой профайл, но никак не в графический редактор. Поэтому прежде, чем вникать в суть этих трюков, пользователю имеет смысл озаботиться приобретением лучших профайлов своих выводных устройств, и вполне вероятно, что надобность в манипуляциях «мнимыми цветами» либо полностью отпадет, либо радикально уменьшится.

Богатая практика автора в колориметрической настройке печатающих устройств показала, что лучшими сегодня являются профайлы (точнее, их Perceptual-таблицы), построенные программами Profile Maker 5.0.8 компании Gretag Macbeth (режим perceptual-мэппинга Logo Colorful), а также Monaco Profiler 4.8.3 компании X-Rite. Третье место по качеству Perceptual-таблиц и инструкций гамут-мэппинга занимает профайл-билдер Print Open 5.2 компании Heidelberg, но при этом программа лидирует в решении проблемы смещения синего в фиолет (описана при разборе тезиса 2). Прочие профайл-билдеры ощутимо уступают перечисленным трем программам.

Приведенные автором данные по истории Perceptual-мэппинга и его исходных принципах, безусловно верны, но мы позволим себе рассказать об этом чуть подробнее, дабы внести ясность в вопрос. Обратимся к тем главам хантовского «Цветовоспроизведения», что посвящены проблемам гамут-мэппинга, в частности к главе 33 «Цифровая печать», и полностью процитируем небольшой раздел, посвященный этому вопросу:

«ГАМУТ-МЭППИНГ

Третьей проблемой, встающей на пути эффективного цифрового цветовоспроизведения, как мы помним, являются неизбежные отличия в форме и размерах цветовых охватов устройств настольного издательского комплекса. Пожалуй, сие самая сложная проблема, решаемая путем т.н. гамут-мэппинга.

Первые методы гамут-мэппинга

На первых порах были предложены четыре возможных варианта (Murch, 1993):

Perceptual (По общему восприятию)

Перцепционные показатели всех элементов оригинала (к примеру, CIELAB-координаты) подвергаются компрессии в направлении белой точки репродукции, причем до такой степени, чтобы не осталось ни одной внегамутной точки. Компрессия выполняется так, что перцепционные отличия масштабируются пропорционально. Данный способ компрессии более всего подходит воспроизведению фотореалистичных изображений.

Colorimetric (Колориметрический)

Колориметрические показатели внутриохватных (внутригамутных) стимулов остаются на своих местах. Показатели внеохватных (внегамутных) стимулов переводятся в положение, ближайшее к колориметрическому соответствию. Очевидно, что сие приводит к некоторому сдвигу распределения цветовых ощущений в сравнении с оригиналом. Данный способ компрессии более всего подходит при воспроизведении т.н. «спотовых» стимулов (областей равномерной окраски).

Tone change (Тоновый сдвиг)

Яркостными соотношениями между элементами оригинала жертвуют во имя удержания требуемых уровней насыщенности (chroma). Данный способ более всего подходит компьютерной графике.

Faster matching (Скоростное уравнивание)

Представляет собой некий компромисс между Perceptual- и Tone change-вариантами. Предлагался в качестве алгоритма, позволявшего сэкономить ресурсы компьютера и сократить время вычислений.

Светлотно-пропорциональный

Вариант компрессии насыщенностей элементов оригинального изображения с коэффициентом, лежащим между единицей и величиной компрессии L*-значений оригинального изображения в тоновый диапазон репродукции с условием полного заполнения (фитинга) последнего (Viggiano и Wang, 1992).

С финальной гамут-экспансией

Еще один вариант гамут-мэппинга (получивший в свое время широкое распространение в полиграфии) строится на компрессии всех цветов оригинала в целевой охват (гамут-компрессия), с последующим фитингом последнего (гамут-экпансия) (McDonald, 1993). Метод приводил к некоторым искажениям цветового тона и светлоты элементов изображения во имя достижения максимальной насыщенности. Примером может служить воспроизведение на оттисках картины ясного синего неба: суап-краситель сам по себе имеет некоторый зеленоватый оттенок, однако коррекция

цветового тона добавкой magenta несколько снижает насыщенность и светлоту (что крайне нежелательно), поэтому, несмотря на искажения в цветовом тоне, старались использовать чистую суап-краску.

Современные методы гамут-мэппинга

LLIN-метод

Одним из весьма распространенных способов гамут-мэппинга до недавнего времени был т.н. LLIN-метод (Morovic, 1998), при котором вначале выполнялась компрессия L^* -значений в целевой тоновый диапазон, а затем производилась редукция насыщенностей, причем в той же пропорции, в которой оказывались сжатые значения L^* (рис. 16).

Справа на рис. 16 показано, как точки охвата оригинального изображения масштабируются в целевой охват: мы видим, что насыщенности в светах, к сожалению, подвергаются большей компрессии, чем насыщенности в середине, нижней трети и тенях тонового диапазона изображения.

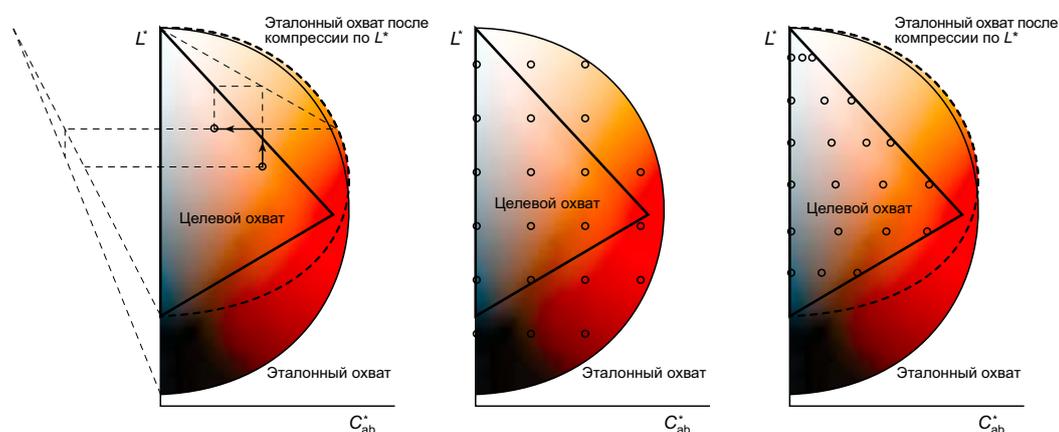


Рис. 16 LLIN-метод гамут-мэппинга. Слева: общая схема геометрического построения векторов компрессии. В центре: облако точек исходного цветового охвата изображения. Справа: облако точек масштабированного цветового охвата изображения.

Еще одной проблемой является то, что коль скоро плоскости постоянного цветового тона в CIE LAB-пространстве не являются истинными (т.н. эффект Эбнея), движение точек вдоль этих плоскостей приводит к некоторым искажениям в цветовом тоне элементов репродукции, что порой весьма досадно.

GCUSP-метод

Еще одним приемом мэппинга, является метод GCUSP, позволяющий избежать искажений цветового тона за счет выполнения расчетов не в CIE LAB, а в перцепционном пространстве т.н. CIECAM97-модели, использующей вместо L^* и C_{ab}^* переменные J и S соответственно.

Так же как и в LLIN-варианте, вначале масштабируются тональные данные (в данном случае это J -данные). При этом значения J есть нелинейная функция от S (малый график на рис. 17 слева внизу).

На следующем этапе S -значения (представляющие полноту цвета — перцепционный показатель, несколько отличный от насыщенности) уменьшаются по линии, соединяющей точку, J -значение которой подвергнуто компрессии, с фокальной точкой на J -оси,

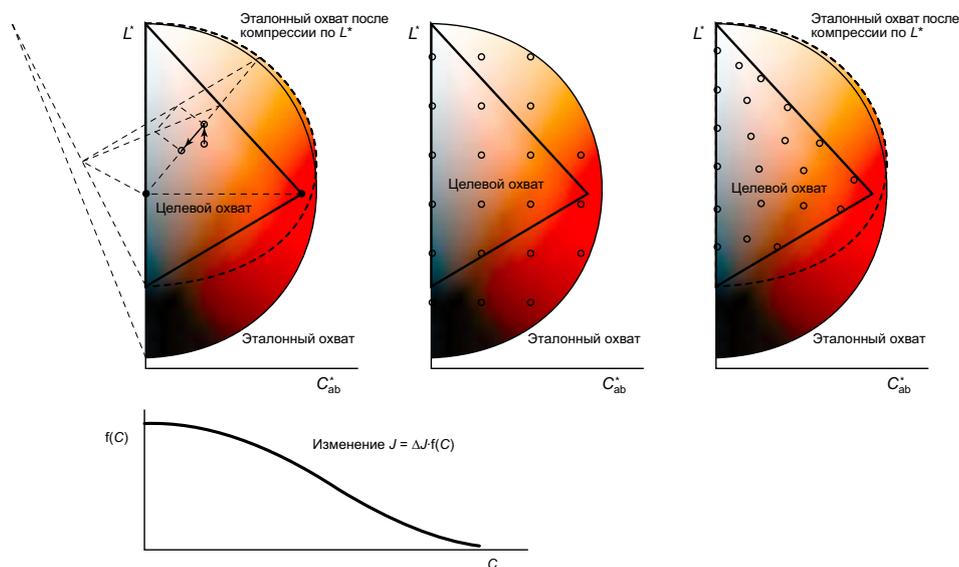


Рис. 17 GCUSP-метод гамут-мэппинга. Слева: общая схема геометрического построения векторов компрессии. В центре: облако точек исходного цветового охвата изображения. Справа: облако точек масштабированного цветового охвата изображения.

расположенной напротив острого выступа фигуры целевого охвата. Редукция полноты цвета происходит в той же пропорции, что отношение длины отрезка от границы целевого охвата до фокальной точки к длине отрезка от границы т.н. эталонного охвата, но сжатого по J , до этой же точки.

Усовершенствовать описанный механизм можно, объединив GCUSP-метод с иными алгоритмами мэппинга, использующими т.н. сигмоидальную компрессию светлоты и т.н. коленно-угловое шкалирование (Braun и Fairchild, 1999 [a] и [b]).

Наконец, отметим, что лучшие алгоритмы гамут-мэппинга всегда контекстны, т.е. в том числе зависят от цветового охвата исходной сцены или ее оригинального изображения (Morovic и Wang, 2003)».

В приведенной цитате Хант упоминает некий эталонный охват (цветовой охват эталонного носителя изображений). Этот охват является ключом к пониманию механизмов гамут-мэппинга, а также к пониманию того, что утверждение Маргулиса, будто версия LAB, используемая программой LinoColor (в Windows-варианте выпускаемая компанией Heidelberg под торговой маркой NewColor), «имеет меньший цветовой охват по сравнению с тем пространством LAB, которое мы знаем и любим» — это чрезмерное упрощение.

Дело в том, что если пользователь Photoshop сохранит файл изображения в LAB, а потом откроет его в той же LinoColor (NewColor), то значения ни одного из пикселей не изменятся: напомним, что LAB-пространство как таковое — это всего лишь координатная система.

Что же тогда имел в виду автор «Каньона», говоря о «меньшем охвате» LAB в версии Heidelberg? Читатель уже успел догадаться, что имелся в виду цветовой охват эталонного носителя (эталонный охват), с помощью которого графический редактор вычисляет векторы цветовых компрессий. Действительно, несколько лет кряду программа LinoColor (NewColor) лидировала в данном вопросе: она использовала свой ориги-

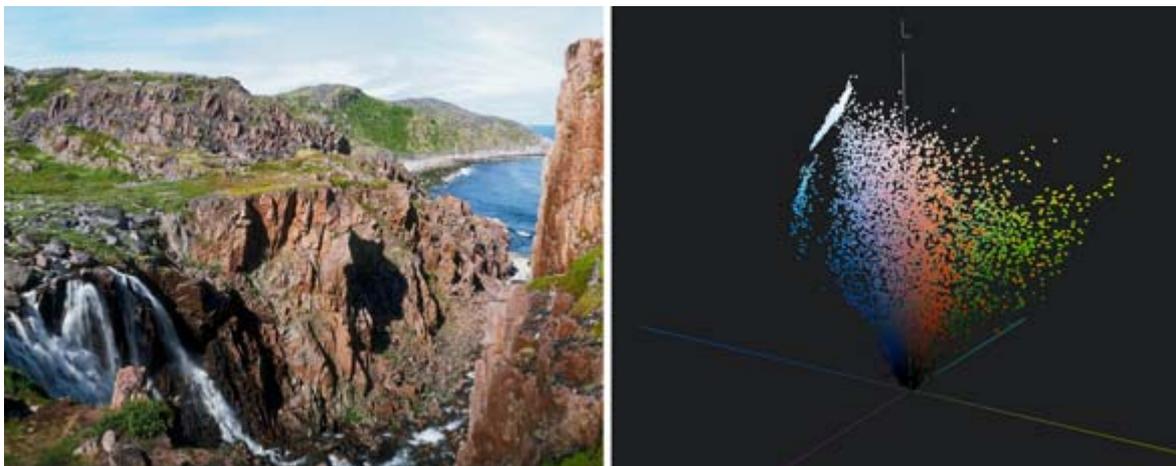


Рис. 18 Слева изображение; справа — облако точек его цветового охвата в координатной системе CIELAB.

нальный вариант охвата эталонного носителя, и охват этот был действительно гораздо меньше охвата цветового тела человека, использовавшегося при выполнении гамут-мэппинга прочими графическими редакторами (в том числе Photoshop). Какими соображениями руководствовались специалисты Heidelberg, мы скажем чуть ниже, а пока обратим внимание читателя на то, что именно происходит с файлом изображения, когда он конвертируется из рабочего трихроматического пространства в целевое пространство аппаратных данных выводного устройства.

Изображение само по себе тоже обладает цветовым охватом и охват этот представляет собой облако точек внутри координатной системы LAB (рис. 18 справа).

Понятно, что каким бы ни был охват изображения, он всегда окажется внутри цветового тела человека (рис. 5 и 6). Поэтому самым простым способом цветовой компрессии, позволяющим уйти от необходимости сверхсложного контекстного анализа изображения графическим редактором, был способ сжатия цветового тела человека в охват назначения. Вместе с этим телом в целевой охват буквально впихивалось и изображение. Такой способ приводил к избыточной компрессии и порой неприемлемому падению насыщенности элементов изображения.

Специалисты, разрабатывавшие LinoColor, рассудили просто: цветовое тело человека — это все возможные цветовые ощущения, которые может испытывать наблюдатель в стандартизированных условиях, а именно: при дневном освещении и 1000 люкс освещенности. При этом в цветовое тело входят и те цветовые ощущения, что могут быть вызваны самосветящимися стимулами, вплоть до монохроматических (узко-спектральных). В учете таких цветов нет совершенно никакой нужды, потому что каких бы технологических высот в будущем не достигла печать (представляющая конечную инстанцию), часть стимулов она не сможет воспроизвести, как говорят, «по физике». К этим стимулам и относятся стимулы самосветящиеся, часть из которых при этом легко воспроизводится мониторами. Поэтому из цветового тела были удалены точки, принадлежащие ощущениям, возникающим только от самосветящихся стимулов и оставлены лишь те, что представляют координаты ощущений, возникающих от стимулов *предметных* (объектных), то есть стимулов, полученных путем отражения

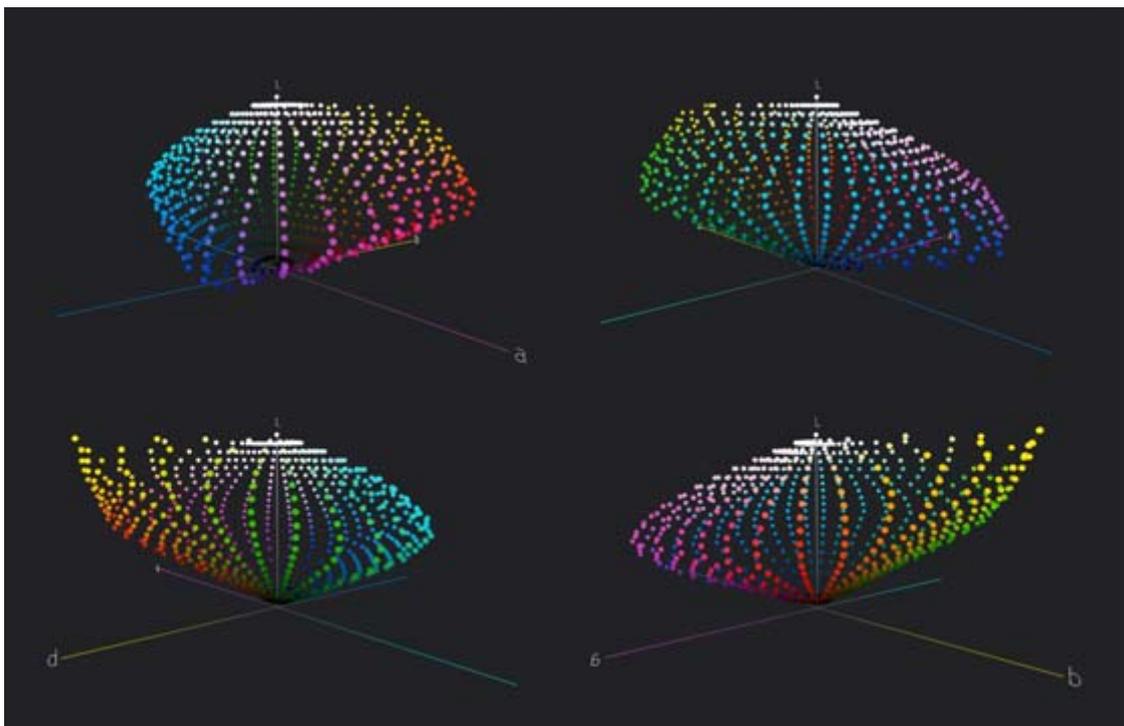


Рис. 19 Поверхность цветового охвата эталонного носителя (эталонного охвата) в четырех проекциях в координатной системе CIELAB. Очевидно, что размер фигуры меньше размера цветового тела человека, но в целом повторяет его форму.

света от различных поверхностей. Получившуюся фигуру и стали использовать в качестве эталонного охвата (охвата эталонного носителя).

Если охват изображения выходил за пределы целевого охвата, но при этом оставался внутри охвата эталонного, то результат компрессии такого изображения был ощущаемо лучшим, т.е. с менее выраженными потерями, чем если бы в целевой охват сжималось все цветовое тело человека.

Если охват изображения содержал точки, лежащие даже вне охвата эталонного носителя (скажем, получаемые за счет сигналов R0 G255 B0 трихроматического пространства Adobe RGB), то такие точки вначале подвергались т.н. *клиппингу* (отсечке) на поверхность эталонного охвата, а потом уже выполнялась компрессия всего изображения.

Чуть более трех лет тому назад ICC-комитет (одним из «отцов-основателей» которого, кстати говоря, является Adobe Systems) стандартизировал фигуру цветового охвата эталонного носителя (рис. 19) и позиционировал специальный тэг, который может быть внедрен в профайлы 4-й версии ICC-спецификации.

Таким образом, сегодня практически все графические программы, в том числе и Photoshop, выполняют гамут-мэппинг с помощью фигуры эталонного цветового охвата, поэтому «отличия между лабами» на сегодняшний день практически сведены к нулю. Подробнее о цветовом охвате эталонного носителя можно почитать на официальном сайте ICC (www.color.org), а также на http://shadrin.foto-one.com/Personal/Shadrin_ReferenceGamut.htm, где можно посмотреть его анимированную 3D-версию.

ТЕЗИС 20:

«Самым известным примером не слишком красочного варианта RGB является sRGB — пространство, которое в конце 90-х годов довольно успешно продвигалось компаниями Microsoft и Hewlett-Packard. Пользователи, предпочитающие более широкий цветовой охват, выбирают Adobe RGB, которое стало чем-то вроде стандарта среди профессиональных фотографов.

Большинство современных устройств потребительского класса предпочитают или требуют sRGB. Поэтому поставщики полиграфических услуг исходят из того, что поступающие к ним RGB-файлы также созданы в sRGB. <...> Тем не менее значительное число квалифицированных пользователей терпеть не могут sRGB и не желают с ним связываться».

Вопрос о том, какое из двух популярных трихроматических пространств — sRGB или Adobe RGB — следует выбирать в качестве целевого пространства RAW-конверсии файлов цифровых фотокамер, а также в качестве рабочего пространства цветокоррекции, остается открытым по сей день, действительно являясь предметом горячих споров, выходящих порой за пределы взаимоуважения собеседников. На самом деле ответ очень прост и однозначен, но, прежде чем быть озвученным, потребует некоторого вступления.

Трихроматическое sRGB пространство — плоть от плоти телевизионный стандарт CCIR-709 (стандарт на колориметрию 709 самых распространенных люминофоров — Hunt, 2004). И сами люминофоры, и стандарт на них разрабатывались, в том числе исходя из условия, что относительный колориметрический охват стимулов телевизионных систем будет адекватен колориметрическому охвату подавляющего большинства естественных сцен.

Прилагательное «естественный» здесь является ключевым: дело в том, что в естественных сценах почти никогда не встречаются интенсивно-голубые объекты, то есть стимулы с колориметрическими показателями суап-красителей (Hunt, 2004). Действительно, даже ясное небо почти никогда не бывает собственно голубым (оно практически всегда синее), даже на крыльях экзотических бабочек и птиц не встречается пигментов, спектральные свойства которых были бы сходны с таковыми у суап-красителей. Таким образом, интенсивно-голубые стимулы являются в абсолютном большинстве случаев искусственными, как говорят — антропогенными.

Ни для кого не секрет при этом, что колориметрия интенсивно-голубых стимулов не попадает в охват sRGB, но, как было показано выше, в этом нет беды в контексте рассуждений о естественных сценах (которым этот охват и предназначен): в самом деле, охват подавляющего большинства пейзажей, городских сцен и даже большинства сцен студийных легко укладывается в колориметрический охват sRGB.

Иное дело сцены (а паче искусственные изображения), в которых присутствуют интенсивно-голубые объекты. К таким сценам, в первую очередь, можно отнести сюжеты, наполненные разного рода упаковкой продовольственных и промышленных товаров: дизайнеры-разработчики упаковки хорошо знают, что, поскольку интенсивно-голубые поверхности почти не встречаются в естественных условиях, такие объекты «бросаются в глаза», моментально обращают на себя внимание, что, собственно, и требуется рекламе и торговле. Действительно, если пройтись по рядам супермаркета, то редко когда найдется упаковка, в оформлении которой не было бы элементов из «чистого циана».

Разумеется, если стоит задача сохранить цвет антропогенных стимулов, особенно, интенсивно-голубых, то и при конверсии RAW-данных, и при цветокоррекции следу-

ет использовать трихроматическое пространство, колориметрический охват которого вмещает в себя координаты таких стимулов. К таковым пространствам прежде всего относится Adobe RGB.

На рис. 20 в проекции на a^*b^* -плоскость даны цветовые охваты sRGB и Adobe RGB и там же позиции точек, представляющих a^*b^* -координаты нескольких наиболее популярных суап-красителей.

Хорошо видно, что точки, представляющие координаты суап-стимулов, лежат вне sRGB-охвата, но внутри охвата Adobe RGB.

Итак, ответ на вопрос «в какое трихроматическое пространство следует выполнять RAW-конверсию и в каком трихроматическом пространстве выполнять цветокоррекцию?» звучит так: RAW-конверсия и цветокоррекция изображений естественных сцен выполняется в sRGB; изображений сцен, содержащих значимые интенсивно-голубые объекты — конвертируются в Adobe RGB.

Разумеется, не будет ошибкой, если RAW-конверсия и дальнейшая цветокоррекция изображения естественной сцены будут выполнены в Adobe RGB. Более того, пользователь может не опасаться, что результаты мэппинга такого изображения в целевой охват будут чем-то отличны от результатов мэппинга того же изображения, но «обитающего» в sRGB-пространстве: дело в том, что характер и степень компрессий, вопреки расхожему мнению, совершенно не зависят от размеров охвата рабочего трихроматического пространства, что очевидно следует из рассуждений, представленных нами при разборе тезиса 19 и что полностью подтверждается практикой.

Однако нельзя забывать, что колориметрия интенсивно-синих элементов в оригиналах, захваченных нехарактеризованной цифровой камерой либо полученных с фотопленок (особенно со слайдов), может очень сильно отклоняться от колориметрии соответствующих объектов сцены. Колориметрические координаты интенсивно-синих элементов (равно как и обсуждавшихся выше голубых) часто оказываются вне охвата монитора (который, как правило, очень схож с охватом sRGB), что может сыграть злую шутку при печати. К примеру: небо, которое на экране смотрелось синим слабой насыщенности и вполне естественным, даже на калиброванной печати вдруг оказывается таким «цианистым», что изображение однозначно уходит в брак; и это при том, что все прочие элементы отпечатка полностью соответствуют экранному их представлению. Поэтому пользователь, который всегда выбирает Adobe RGB, должен помнить либо о необходимости финального числового контроля потенциально проблемных синих объектов (в первую очередь неба) по памятным значениям LAB, либо же о необходимости вы-

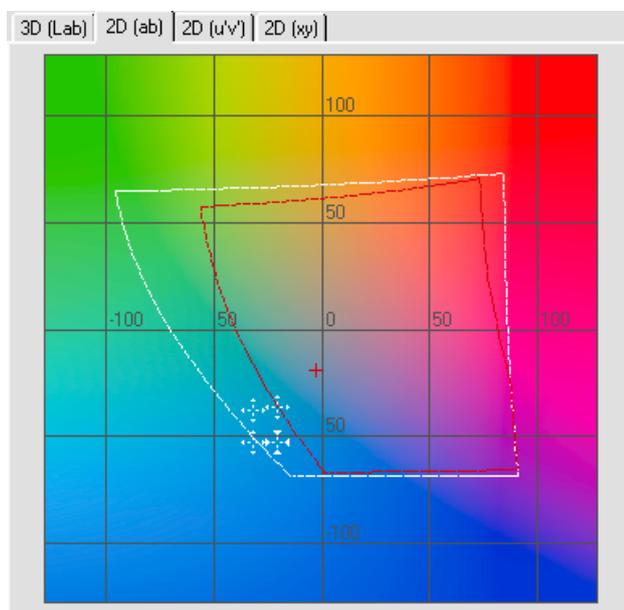


Рис. 20 Белый контур — охват трихроматического пространства Adobe RGB на уровне L^*50 ; красный контур — охват трихроматического пространства sRGB на уровне L^*50 ; белые крестики — цветовые координаты четырех различных суап-красителей.



Рис. 21 Цифровое изображение, полученное из RAW-файла камеры Pentax K-10 путем конверсии в трихроматическое пространство Adobe RGB. Однако чтобы колориметрический охват даже этого изображения вышел за пределы sRGB, пришлось принудительно усилить насыщенности оранжевых и слегка сместить их цветовой тон в желтом направлении. Справа на диаграмме хорошо видна группа точек, лежащая вне охвата sRGB, но внутри охвата принтера Epson Stylus Pro 11880 при печати на Epson Premium Semigloss. Срез на уровне L*80.

вода печатных проб. Напомним также, что интенсивно-голубые стимулы находятся вне охвата большинства люминофоров и экраном обычно интерпретируются синими малой насыщенности.

Наконец, отдельно стоит сказать насчет особо насыщенных желтых стимулов: они встречаются в некоторых естественных сценах, их колориметрические показатели попадают в охват hi-end-принтеров, но при этом оказываются вне sRGB-охвата. В охвате сцены, показанной на рис. 21, имеются стимулы, цвета которых выходят за границы охвата sRGB (точнее, LAB-представления этого охвата), но при этом лежат внутри цветового охвата принтера Epson Stylus Pro 11880 при его работе на Premium-бумагах.

Таким образом, любителям пылающих закатов или молодой листвы напросвет всегда показано использование трихроматического пространства Adobe RGB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье были разобраны те положения общей концепции обработки и воспроизведения цифровых изображений, что, на наш взгляд, представляют наибольшие трудности для понимания и осмысленного практического применения. Вместе с тем следует особо подчеркнуть, что мы не искали опровержения материалов Дэна Маргулиса, но лишь преследовали цель более полного раскрытия сложных и спорных моментов, что поможет извлечь читателю максимум пользы из книг этого замечательно-го и талантливого автора.

ЛИТЕРАТУРА:

- В. Железняков. Цвет и контраст. Технология и творческий выбор. М.: ВГИК, 2000.
- А. Френкель, А. Шадрин. Колориметрическая настройка монитора. Теория и практика. М.: Август-Борг, 2005.
- S. Fernandez and M.D. Fairchild. Observer preferences and cultural differences in color

reproduction of scenic images. IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale, 66—72 (2002).

R.W.G. Hunt. The Reproduction of Colour. 6th Ed. John Wiley & Sons, Ltd, USA (2004).

S.E. Palmer. Vision Science: Photons to Phenomenology. MIT Press, Cambridge (1999).

B.A. Wandell. Foundations of Vision. Sinauer, Sunderland, Mass. (1995)

W.D. Wright. 50 years of the 1931 CIE standard observer for colorimetry. AIC Color 81, Paper A3 (1981b).

R.M Evans. Eye, Film, and Camera in Color Photography. Wiley, New York (1959).

M.D. Fairchild. Color Appearance Models. 2th Ed. John Wiley & Sons, Ltd, USA (2004).

H.E.J. Neugebauer, Z. Tech. Phys., 36, 22 (1937).

A.C. Hardy and F.L. Wurzburg. J. Opt. Soc. Amer., 38, 300 (1948).

1 М.Д. Fairchild «Color Appearance Models» (с русским переводом можно познакомиться на сайте: http://shadrin.rudtp.ru/Personal/Shadrin_articles8.htm)