

Л.Д. Ложкин, В.А. Неганов

**Цвет, его измерение, воспроизведение и
восприятие в TV**

Монография в двух частях

Часть II

Самара, 2013

УДК 535.65: 621.397

Рецензенты:

Заведующий кафедрой теории информатики Арзамасского государственного педагогического института им. А.П. Гайдара, действ. чл. АИО, д.п.н., профессор

Вострокнутов И.Е.

Заведующий кафедрой общей информатики СГАУ, д.т.н., профессор

В.А. Фурсов

Ложкин Л.Д., Неганов В.А.

Цвет, его измерение, воспроизведение и восприятие в телевидении. В двух частях. Самара: ПГУТИ. 2013 – 286 с.

ISBN 978-5-904029-36-4

В монографии излагается история развития измерений света и цвета, роль цвета в деятельности общества и человека. Рассматриваются колориметрические системы, методы и приборы измерений цвета. Дается анализ погрешности измерений различных методов. Авторами монографии разработан программный комплекс по измерению порогов цветоразличения в условиях телевизионного наблюдения. На основе дифференциальной геометрии авторы дают методику и разрабатывает строго равноконтрастные цветовые системы как двумерные, так и трехмерные.

Рассмотрены вопросы цветовоспроизведения и цветовосприятия в телевидении, показаны цветовые искажения и предлагаются метод коррекции цветовых искажений.

В монографии приведены результаты более 40 летнего опыта работы одного из авторов в области колориметрии.

Данная монография рассчитана на студентов ВУЗов старших курсов, аспирантов и специалистов, работающих в области цветовоспроизведения, обработки изображений, цветовых измерений и других областях, связанных с цветовосприятием.

УДК 535.65: 621.397

ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2013

Ложкин Л.Д., 2013

Неганов В.А., 2013

ISBN 978-5-904029-36-4

6. Высшая колориметрия.

Восприятие цвета

В 1973 году Г. Вышецкий так описывает область высшей колориметрии[1]: «Колориметрия в более широком смысле включает в себя методы оценки восприятия цветового стимула, предъявленного наблюдателю в сложном окружении, которое мы наблюдаем в повседневной жизни. Оценку восприятия считают конечной целью колориметрии, но из-за своей невероятной сложности эта цель очень далека от своего достижения. С другой стороны, некоторые аспекты общей проблемы прогнозирования цветового восприятия стимулов не кажутся столь неуловимыми: известные примеры - измерение цветовых различий, белизны и хроматической адаптации (хотя по большому счету и эти проблемы все еще не решены, и дальнейшая работа в этих областях весьма интересна и практически важна).»

Высшая колориметрия рассматривает вопросы сравнения двух и более цветов, т.е. непосредственное цветовосприятие. Процесс воспроизведения любого объекта можно отобразить следующей схемой, показанной на рис. 6.1 [2].

Как видно из этого рисунка, мозгом человека при воспроизведении в первую очередь решается задача сопоставления увиденного с ранее виденным и находящимся в памяти, в противном случае это уже усвоение нового.

При воспроизведении цветного изображения, будь то репродукция, цветная фотография, изображение на экране телевизора, компьютере и пр., задача несколько усложняется, т.к. увеличивается объем информации, и о верности цветопередачи человек может судить в основном, только опираясь на свою память (при условии, что в этот момент человек не видит оригинал). Поэтому в данном случае необходимо воспроизвести процесс аппаратно-независимого цветовоспроизведения, показанного на рис. 6.2 [2].

Устройство ввода изображения характеризуется колориметрическими характеристиками, позволяющими преобразовать аппаратные координаты, например, RGB в колориметрические координаты, пусть то будут МКО XYZ или МКО LAB, которые принадлежат аппаратно-независимому цветовому пространству, т.е. пространству, в котором колориметрические координаты не зависят от специфики цветовоспроизводящего устройства.

Модели смены хроматической адаптации, модели цветовосприятия позволяют произвести учет информации об условиях просмотра изображения оригинала и применение к колориметрическим данным учета смены хроматической адаптации и (или) модели цветовосприятия. Последнее выполняется для преобразования данных XYZ МКО в размерности с параметрами восприятия, такими как светлота, насыщенность и цветовой тон. При выполнении таких преобразований цветовые координаты отражают влияние на цветовосприятие специфики устройства и условий просмотра, т.е. они принадлежат просмотро-независимому цветовому пространству. На этом этапе наиболее удобно

производить всевозможные манипуляции с цветным изображением, такие как цвето и гамма коррекция, тоновая редакция и т.п. Отметим, что на этом этапе параметры цветовосприятия элементов изображения принимают окончательные значения.

Далее процесс повторяется, но в обратном порядке и применительно к выходному устройству воспроизведения репродукции.

Для одинакового цветовоспроизведения при различных аппаратных средствах требуется калибровка устройств. Хотя калибровка устройства - это в основном задача производителя, но она необходима, поскольку калибровка приводит устройства визуализации к определенному состоянию, в частности, к правильному восприятию белого, определенному усилению. Калибровка гарантирует, что цветовоспроизводящее устройство вне зависимости от аппарата сегодня и завтра будет выдавать стабильные результаты.

Какой бы из бесчисленных трехцветных методов получения цветных изображений мы не взяли, мы найдем в нем ряд элементов, свойственных всякому из них. В каждом трехцветном процессе тот или иной цвет, получаемый на изображении, возникает в результате того, что независимые величины (например, количества трех красок при печати или трех элементов одного пикселя изображения на экране цветного монитора) принимают те или иные независимые друг от друга значения. При этом существенно отметить, что всякий цвет, если только он вообще может быть осуществлен при данных красках либо основных цветов экрана монитора (цветовой охват) и данным способе

их смешения, получается только при строго определенных количествах этих красок или яркости каждого из основных цветов (при вполне определенных значениях трех переменных величин синтеза). Всякое изменение хотя бы одного из этих количеств неминуемо влечет за собой и изменение цвета на изображении. Иначе говоря, во всяком трехцветном методе осуществления изображения между значениями трех независимых переменных факторов и получаемым цветом существует взаимно-однозначное соответствие, поскольку мы ограничиваемся только теми цветами, которые могут быть обеспечены цветовым охватом данного синтезирующего (цветовоспроизводящего) устройства (п. 4.2.8 стр. 147, том I).

Таким образом, каждый цветовой оттенок, имеющийся на оригинале, требует для своего точного воспроизведения вполне определенных значений каждого из трех переменных факторов синтеза. Отсюда вытекает естественная идея: путем трех фотографирований поочередно, вульгарно выражаясь, «выделить» все три элемента, необходимые для последующего синтеза изображения (в телевидении роль «трех фотографий» выполняет трехцветная телекамера). Таким образом родился термин «цветоделение», цветоделённые негативы и т. д. Полученные цветоделённые негативы подвергаются затем более или менее длительной обработке, превращению в позитивы, рельефные желатиновые слои, матрицы и т. д. Характерным для этой стадии работы является раздельность обработки каждого из трех цветоделённых негативов, то есть весь процесс распадается на три параллельных, совершенно самостоятельных, как бы одноцветных процесса. В конечном результате мы по-

лучаем три однокрасочных (цветных) изображения, из которых синтезируется многоцветная картина, причем дозировка каждой из красок целиком зависит только от одного из трех первоначальных цветоделенных негативов.

В процессе обработки цветоделенного негатива и изготовления последующих «форм» мы имеем возможность произвести весьма разнообразные перераспределения первоначально полученных плотностей. Мы можем равномерно или пропорционально, или по более сложному закону повысить или понизить все плотности изображения, можем повысить или понизить контраст, можем в известных случаях даже изменить форму характеристической кривой. Мы часто бываем вынуждены вносить эти изменения в распределения плотностей помимо нашей воли, в силу тех или иных свойств производимых операций.

Все эти изменения столь значительны, что в принципе представляется как-будто возможность исправления любых недостатков негатива во время последующих стадий работы. Однако это далеко не так. Несмотря на разнообразие вносимых изменений или тех изменений, которые мы, учитывая возможное развитие техники, можем вносить в будущем, есть нечто, что никакой дальнейшей обработкой негатива изменить нельзя. Это нечто и кажется целесообразным назвать *цветоделением*. Фотографируя многоцветный оригинал, мы получаем вместо трехмерного многообразия цветов одномерное многообразие различных плотностей на негативе, вследствие чего неминуемо многие места оригинала, различающиеся друг от друга по цвету на том или ином из цветоделённых негативов, передадутся одинаковыми плотностями.

Очевидно, что, как бы мы ни вели дальнейшую обработку негатива и изготовление с него последующих «форм», те места, которые имели одинаковую плотность на негативе, останутся одинаковыми и на всех этих формах, и в конечном итоге количество соответствующей краски (или при аддитивных методах – количество соответствующего света) на этих местах полученного изображения будут тоже одинаковыми.

Поэтому, если нам с принципиальной точки зрения не особенно важно, каковы будут плотности на том или ином месте негатива, для нас крайне существенно, чтобы плотности, соответствующие тем местам оригинала, которые требуют одинакового количества выделяемой краски, уже на негативе были бы одинаковыми, а места, требующие разных количеств той же краски — имели бы различную плотность. Если негатив этому требованию не удовлетворяет, никакая дальнейшая работа над ним, за исключением исправлений вручную, не сможет предохранить репродукцию от цветовых искажений. Поэтому задачу получения на негативе равных плотностей там, где требуются одинаковые, и различных плотностей, где требуются различные количества выделяемой краски, будем рассматривать как особую задачу и назовем это *задачей цветodelения*.

Если задача цветodelения выполнена с достаточной точностью, то получение вообще правильной цветопередачи не представляет никаких принципиальных трудностей (технические трудности, конечно, всегда могут встретиться). В этом случае между плотностями на негативе и потребным количеством выделяемой краски имеется взаимно - однозначное соответствие (формула связи того и другого

может быть и очень сложной эмпирической, но нам важно, что она взаимно - однозначна). Поэтому задачей дальнейшего использования негатива является то, как провести процесс, чтобы при синтезе изображения каждой из плотностей негатива соответствовало как раз нужное количество выделяемой краски на изображении. Эта задача, в конце концов, есть задача, эквивалентная подбору характеристических кривых материалов под заданную заранее форму. Такую задачу будем называть задачей *шкалы плотностей*.

Таким образом, получение правильной цветопередачи складывается из решения двух совершенно самостоятельных задач — задачи цветоделения и задачи шкалы плотностей. Каждая из этих задач решается на различных стадиях процесса и с использованием различных технических средств. Решение задачи цветоделения зависит только от спектральной чувствительности датчика и от кривой пропускания фильтра, точнее — от произведения ординат этих кривых. Проблема цветоделения должна быть выполнена в процессе самой съемки. Эту стадию репродукционного процесса поэтому целесообразно выделить в особую *аналитическую стадию*. Во время аналитической стадии свет того или иного спектрального состава в зависимости от этого состава и интенсивности, а также в зависимости от кривой пропускания фильтра и спектральной чувствительности датчика, превращается в продукт фотохимической реакции, количество которого после проявления определяет плотность негатива.

Уже проявление негатива и все последующие стадии работы, вплоть до получения трех однокрасочных частичных изображений, образуют второй *переходный этап* ра-

боты, на котором надлежит произвести решение задачи шкалы плотностей. Подобно тому, как нельзя предъявить никаких определенных требований отдельно к светофильтрам и отдельно к спектральной чувствительности эмульсии, а лишь к их совокупности (произведение кривых), отдельные стадии переходного процесса обладают известной взаимозаменяемостью. Поэтому требования шкалы плотностей представляют собой связь между количеством энергии, прореагировавшей в эмульсионном слое (актиничность), и количеством соответствующей краски на готовом изображении. Эту связь мы будем в дальнейшем называть характеристической кривой всего переходного процесса в целом, точно так же, как под кривой чувствительности эмульсии будем для простоты подразумевать произведение кривой пропускания светофильтра на кривую спектральной чувствительности эмульсии. Последняя должна быть выражена в энергетических единицах (величина, обратная количеству энергии заданной длины волны, необходимому для получения заданного фотографического эффекта).

Последняя стадия репродукционного процесса — синтез трех частичных цветных изображений в одну многоцветную картину. Свойства синтетического процесса зависят от выбора синтезируемых элементов (красок, излучений), а также от избранного метода синтеза. Здесь мы имеем крайнее разнообразие методов работы, так как изобретательская мысль больше всего работала именно в этом направлении. Однако надо с полной отчетливостью сказать, что вопрос точной цветопередачи решается не выбором метода на какой-либо одной стадии репродукционного

процесса, а достижением надлежащего *соответствия* между ними. Более того, как мы увидим в дальнейшем, достижение правильной цветопередачи должно идти не по линии приспособления процесса синтеза изображения к заданному аналитическому процессу, а как раз наоборот — аналитический процесс должен выбираться в зависимости от конкретных свойств красок, из которых синтезируется изображение, и от методов этого синтеза.

Следует указать еще на одно ходячее представление, имеющее своим основанием недоразумение. Многие работники, соблазненные кажущейся симметрией аналитического процесса как процесса получения трех черных изображений вместо одного цветного (оригинала), и синтетического, как процесса получения цветного изображения вместо трех одноцветных, направляли свою мысль на то, чтобы иметь в синтетическом процессе как бы инверсию процесса аналитического, нечто вроде обратного хода лучей в геометрической оптике. К сожалению, такая постановка вопроса является наивной, так как в трехцветном репродукционном процессе не может быть и речи ни о какой физической инверсии.

В конечном итоге нас удовлетворило бы такое решение вопроса, при котором любой зритель, рассматривая цветное изображение и изображаемый объект в натуре, не замечал бы резких расхождений одного от другого, т.е. легко отождествлял бы изображаемый объект с его изображением [2].

Мы уже говорили выше, что с чисто физической точки зрения трехцветная репродукция ни в какой степени не является повторением оригинала. Если спектральный состав

света вполне определяет возникающие под его действием плотности под тремя светофильтрами, то обратное вовсе не имеет места. Три плотности даже при знании кривых пропускания светофильтров не определяют однозначно спектрального состава света, которым они вызваны. Поэтому синтетический трехцветный процесс по самому существу не может быть построен как инверсия в физическом смысле процесса аналитического. Вся трехцветная репродукция тесно связана, как мы показали, с особенностями устройства нашего зрения, и вне учета этих особенностей трехцветная репродукция существовать не может.

Ложная идея физической инверсии сказалась, между прочим, на классификации методов цветной фотографии с разделением их на прямые и косвенные.

К прямым методам относят метод Липпмана, а также все те трехцветные методы (вроде метода выцветаний), в которых переходный процесс сведен до минимума. Мы сами в свое время выделили метод Липпмана как особый, действительно основанный на идее физической инверсии, которую только в этом методе и возможно ставить, но вовсе не потому, что он «прямой», а потому, что обладает возможностями стремиться к физически точной репродукции. Все же трехцветные методы, «прямые» они или «косвенные», содержат ли они переходную стадию процесса или она сведена к минимуму (отсутствовать совсем она не может, так как невозможно совсем снять проблему шкалы плотностей), принципиально ничем друг от друга не отличаются. Максимум, чего они могут достигнуть— это физиологическая точность, не имеющая объективного смысла вне свойств нашего глаза.

Что касается проблемы цветоделения и проблемы шкалы плотностей, то, несмотря на четкие границы между средствами разрешения одной и другой, на готовой репродукции часто бывает довольно трудно судить, чем вызваны недостатки цветопередачи в том или ином конкретном случае. Некоторые склонны думать, что правильная передача цветовых тонов и насыщенностей и есть задача цветоделения, оставляя на долю шкалы плотностей только значение в передаче яркостных соотношений. Покажу на примере, что это неверно. Допустим, мы имеем репродукцию, идеально воспроизводящую ряд желто-оранжево-красных оттенков, получаемых в результате синтеза пурпурно-красной и желтой красок в различных соотношениях. Допустим теперь, что мы имеем на негативах в светлых частях изображения слишком высокий контраст. Это, очевидно, приведет к слишком большому количеству краски в тех местах, где ее должно быть мало. В результате этого желтый - чуть-чуть оранжеватый - воспроизводится слишком оранжевым, точно так же слегка оранжеватый красный оригинала будет на репродукции чрезмерно сильно отличаться от красного.

На подобных примерах нетрудно разобрать и всевозможные другие случаи цветных искажений, вызванных ошибками в передаче шкалы плотностей, и убедиться, что эти ошибки всегда сопровождаются весьма значительными искажениями в передаче тех цветовых тонов, которые отличаются от цветовых тонов синтезируемых красок. При некотором внимании эти искажения цветовых тонов едва ли не лучше, чем яркостные искажения, помогут выяснить

недостатки осуществленной шкалы плотностей (в частности, недостатки гаммы).

6.1. Условие независимости от спектрального состава

Проблема цветоделения является для цветной репродукции наиболее трудной как со стороны сложности самой задачи, так и по той причине, что единственным средством ее решения является выбор кривой спектральной чувствительности эмульсии (вместе со светофильтром).

На первый взгляд может показаться, что большое разнообразие всевозможных кривых пропускания светофильтров позволит для любого случая найти фильтры, дающие достаточно хорошее цветоделение. Однако важная теорема, которую мы сейчас докажем, приводит нас к заключению, что возможный выбор этих кривых весьма ограничен, так как огромное большинство кривых пропускания принципиально не пригодно для точного выполнения задачи цветоделения ни для какого метода синтеза изображений. Это, в частности, будет доказательством и того, что нельзя, задавшись более или менее произвольно светофильтрами, подбирать затем краски и метод синтеза изображения, для которых цветопередача была бы правильной. Правильным будет как раз обратное: не краски надо подбирать к светофильтрам, а светофильтры к краскам.

Переходим к изложению теоремы.

Общеизвестно, что излучения, весьма различные по спектральному составу, могут быть тождественны по цвету. В любом трехцветном (можно рассматривать и случаи большего количества красок (цветов) с незначительными изменениями) репродукционном процессе такие одинаковые по цвету излучения, очевидно, должны давать одинаковые плотности на всех трех негативах. Если бы этого не было, то соответствующие места репродукции получили бы различное количество той или иной краски, а, следовательно, в одном из случаев цвет был бы заведомо искажен. Поэтому мы можем сформулировать следующее положение.

Независимо от того, как и из каких элементов (например, из каких красок) синтезируется изображение, кривые спектральной чувствительности эмульсии (вместе со светофильтром) должны быть таковы, чтобы любые излучения, одинаковые по цвету, давали бы на негативе обязательно одинаковые плотности, каково бы ни было спектральное распределение энергии этих излучений.

Это положение легко записать математически при условии, что излучения света $E_1(\lambda)$ и $E_2(\lambda)$ были бы тождественны по цвету, т.е.[82]:

$$\left. \begin{aligned} \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) \partial\lambda &= \int_{380}^{730} E_2(\lambda) \bar{x}(\lambda) \partial\lambda \\ \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) \partial\lambda &= \int_{380}^{730} E_2(\lambda) \bar{y}(\lambda) \partial\lambda \\ \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) \partial\lambda &= \int_{380}^{730} E_2(\lambda) \bar{z}(\lambda) \partial\lambda \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Напишем условие, чтобы два излучения $E_1(\lambda)$ и $E_2(\lambda)$ давали бы одинаковые плотности на негативе. Если область чувствительности эмульсии простирается от λ_1 до λ_2 , а произведение спектральной чувствительности эмульсии на пропускание фильтра есть некоторая функция длины волны $p(\lambda)$, то условие равенства почернений на негативе для излучений $E_1(\lambda)$ и $E_2(\lambda)$ будет:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_1(\lambda) p(\lambda) \partial\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_2(\lambda) p(\lambda) \partial\lambda. \quad (6.2)$$

Поэтому в математической форме это положение может быть сформулировано следующим образом:

Спектральная чувствительность эмульсии (со светофильтром) $p(\lambda)$ при каждой съемке должна быть непременно такой, чтобы любые две функции $E_1(\lambda), E_2(\lambda)$, удовлетворяющие условиям (6.1), удовлетворяли также и условию (6.2). Иначе говоря, равенство (6.2) должно быть

простым следствием равенства (6.1) для любых $E_1(\lambda)$ и $E_2(\lambda)$.

Известная математическая теорема [4] утверждает, что необходимым и достаточным условием вышеописанных требований является наличие линейной зависимости между функциями, $\bar{p}(\lambda), \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$, т.е. для $\bar{p}(\lambda)$ выполнятся следующее условие:

$$p(\lambda) = \alpha \cdot x(\lambda) + \beta \cdot y(\lambda) + \gamma \cdot z(\lambda), \quad (6.3)$$

где α, β, γ - произвольные числа, как положительные, так и отрицательные.

6.2. Кривые сложения и элементы векторной теории цвета

Так как во всем дальнейшем мне придется много ссылаться на положения векторной теории цвета, то, не ограничиваясь литературными ссылками, вкратце изложу здесь важнейшие из этих положений.

Всякий цвет (по научной терминологии – «стимул») вполне характеризуется при заданных условиях наблюдения спектральным составом света, действующим на глаз. Так как равенство по цвету двух излучений различного спектрального состава определяется тремя равенствами (6.1), то величины интегралов, входящих в это равенство, могут служить тремя численными характеристиками для любого цвета. Тогда равенство (6.1) можно рассматривать как равенство трех характеристик, однозначно опреде-

ляющих цвет. Эти характеристики носят название *цветовых координат* или *компонент цветового вектора*.

Возьмем прямолинейную систему координатных осей в пространстве и выберем единицы масштаба по каждой из осей, то есть, иначе говоря, выберем три единичных вектора (направление единичного вектора определяет направление оси, а его длина — единицу масштаба). Будем теперь для каждого цвета определять его «положение в пространстве» в точке, координаты которой определяются величинами интегралов равенства (6.1). Таким образом, для любого распределения энергии $E_1(\lambda)$ мы можем сначала найти величины трех интегралов, а затем и соответствующую точку пространства. В силу условия тождества по цвету (6.1) все излучения, одинаковые по цвету, попадут «в ту же точку», а различные по цвету — в различные точки, то есть каждой полученной таким путем точке будет соответствовать вполне определенный цвет. Не трудно видеть, что цвета, близкие друг к другу, будут попадать в близкие точки пространства.

Во многих отношениях выгодно изображать цвет не точкой, а вектором, проведенным в эту точку из начала координат. Тогда величины интегралов (цветовые характеристики) будут представлять собой компоненты соответствующего вектора по отношению к выбранной системе единичных векторов. Так, например, если для какого-либо цвета, представленного излучением с распределением энергии $E_1(\lambda)$, цветовые характеристики равны:

$$\begin{aligned}
& \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \partial\lambda = a_1, \\
& \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \partial\lambda = b_1, \\
& \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \partial\lambda = c_1,
\end{aligned} \tag{6.4}$$

то соответствующий этому цвету вектор **A** будет связан с тремя единичными векторами **I**, **J**, **K** равенством (здесь и далее жирным шрифтом обозначены векторы):

$$\mathbf{A} = a_1 \cdot \mathbf{I} + b_1 \cdot \mathbf{J} + c_1 \cdot \mathbf{K}. \tag{6.5}$$

Изображение цвета вектором удобно в том отношении, что при сложении цветов (аддитивном смешении) получаемый цвет определится (это легко видеть из определения цветовых характеристик) как векторная сумма векторов, соответствующих слагаемым цветам. Сами цветовые компоненты получают при этом вполне определенный экспериментальный смысл, как это видно из формулы (6.5), а именно: они показывают, в каких количествах надо сложить (смешать аддитивно) три цвета, соответствующих единичным векторам, чтобы получить данный цвет **A**.

Не трудно увидеть, каков экспериментальный смысл ординат кривых смешения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

Для чего найдем по формуле (6.4) цветовые характеристики для какого-либо чистого спектрального цвета, определяемого длиной волны λ_0 при количестве энергии на единицу поверхности, равной единице (что означает в весьма узком интервале длин волн $[\lambda_0, \lambda_0 + \Delta\lambda]$, заключена одна единица энергии).

А так как интервал достаточно мал, то можно считать распределение энергии внутри него постоянным, то есть $E_1(\lambda) = \frac{1}{\partial\lambda}$ внутри интервала: $[\lambda_0, \lambda_0 + \Delta\lambda]$, за пределами этого интервала $E_1(\lambda) = 0$. Тогда формулы (5.4) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\partial\lambda} \int_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \partial\lambda} x(\lambda) \partial\lambda &= a; \\ \frac{1}{\partial\lambda} \int_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \partial\lambda} y(\lambda) \partial\lambda &= b; \\ \frac{1}{\partial\lambda} \int_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \partial\lambda} z(\lambda) \partial\lambda &= c, \end{aligned} \tag{6.6}$$

или в силу малости $\partial\lambda$

$$a = \bar{x}(\lambda), \quad b = \bar{y}(\lambda), \quad c = \bar{z}(\lambda),$$

иначе говоря, ординаты кривых смещения суть не что иное, как компоненты цветовых векторов равноэнергетического спектра, т.е. такого спектра, у которого все ординаты равны единице в интервале длин волн от 380 до 730 нм.

Система прямолинейных координат в пространстве определяется тремя векторами, а так как векторами мы изображаем цвета, то мы можем говорить о наличии трех единичных цветов **I**, **J**, **K**, по отношению к которым определяются все остальные цвета. Однако выбор тех или иных

цветов в качестве единичных, вообще говоря, может быть сделан произвольно [2].

При замене одних единичных цветов другими цветовые характеристики всех цветов изменятся (в частности, изменятся и кривые сложения как характеристики цветов спектра). Так как мы исходим в нашем построении из стандартных кривых сложения, то в нашей системе единичными цветами являются стандартные единичные цвета Международной Комиссии по Освещению (МКО) : **X**, **Y**, **Z**:

$$\mathbf{I} = \mathbf{X}; \mathbf{J} = \mathbf{Y}; \mathbf{K} = \mathbf{Z}.$$

Возьмем какие-нибудь три вектора **A**₁, **A**₂, **A**₃ цветового пространства, не лежащие в одной плоскости. Им будут соответствовать три цвета, из которых ни один не может быть получен аддитивным смешением двух других. Эти три вектора образуют новую систему прямолинейных координат цветового пространства.

Найдем для всех цветовых векторов компоненты относительно этой новой системы координат. Таким путем мы получим другую систему, характеризующую любой цвет через посредство новых трех цветов **A**₁, **A**₂, **A**₃. Пусть, например, некоторый цвет **B** имел по старой системе характеристики ξ, η, ζ , а по новой b_1, b_2, b_3 ; это значит, что:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \xi \cdot \mathbf{X} + \eta \cdot \mathbf{Y} + \zeta \cdot \mathbf{Z} \\ \mathbf{B} &= b_1 \cdot \mathbf{A}_1 + b_2 \cdot \mathbf{A}_2 + b_3 \cdot \mathbf{A}_3 \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

равенства (6.7) являются одновременно векторными и цветовыми уравнениями, говорящими о том, как может быть получен цвет **B** при аддитивном сложении цветов **X**, **Y**, **Z** или цветов **A**₁, **A**₂, **A**₃.

Нас интересует, как изменятся кривые сложения при переходе от одной системы координат к другой. Для этого обратимся к аналитической геометрии, в которой, как известно, формулы перехода от одной косоугольной системы координат к другой являются формулами первой степени и определяются девятью коэффициентами: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \alpha_1 \cdot \xi + \beta_1 \cdot \eta + \gamma_1 \cdot \zeta \\ b_2 &= \alpha_2 \cdot \xi + \beta_2 \cdot \eta + \gamma_2 \cdot \zeta \\ b_3 &= \alpha_3 \cdot \xi + \beta_3 \cdot \eta + \gamma_3 \cdot \zeta \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

Уже было показано, что ординаты кривых смешения представляют собой координаты спектральных цветов относительно выбранной системы координат, а поэтому к ним можно применить формулы преобразования координат (6.8). При этом должно выполняться следующее условие:

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{vmatrix} \neq 0.$$

Введем обозначения $\alpha_1(\lambda), \alpha_2(\lambda), \alpha_3(\lambda)$ кривых сложения для некоторой новой системы координат, определим их с помощью стандартных кривых сложения:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \alpha_1 \cdot \bar{x}(\lambda) + \beta_1 \cdot \bar{y}(\lambda) + \gamma_1 \cdot \bar{z}(\lambda) \\ a_2 &= \alpha_2 \cdot \bar{x}(\lambda) + \beta_2 \cdot \bar{y}(\lambda) + \gamma_2 \cdot \bar{z}(\lambda) \\ a_3 &= \alpha_3 \cdot \bar{x}(\lambda) + \beta_3 \cdot \bar{y}(\lambda) + \gamma_3 \cdot \bar{z}(\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (6.9)$$

Коэффициенты преобразования $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: при переходе к системе единичных цветов A_1, A_2, A_3 определяются из условия, связывающего эти цвета со стандартными цветами X, Y, Z :

$$\begin{aligned} X &= \alpha_1 \cdot A_1 + \alpha_2 \cdot A_2 + \alpha_3 \cdot A_3 \\ Y &= \beta_1 \cdot A_1 + \beta_2 \cdot A_2 + \beta_3 \cdot A_3 \\ Z &= \gamma_1 \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot A_2 + \gamma_3 \cdot A_3 \end{aligned} \quad (6.10)$$

На практике обычно поступают следующим образом. Выбранные цвета A_1, A_2, A_3 измеряются колориметром. Результатом измерения являются координаты цветности $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$. Таким образом, в результате колориметрирования коэффициенты уравнений [2]:

$$\begin{aligned} A_1 &= x_1 \cdot X + y_1 \cdot Y + z_1 \cdot Z, \\ A_2 &= x_2 \cdot X + y_2 \cdot Y + z_2 \cdot Z, \\ A_3 &= x_3 \cdot X + y_3 \cdot Y + z_3 \cdot Z. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Решая систему уравнений (6.11) относительно X, Y, Z , находятся нужные коэффициенты.

6.3. Задачи цветоделения для аддитивных процессов

Мы позволили себе остановиться несколько подробнее на вопросе о переходе от одних цветовых координат к другим, потому что такого рода расчеты являются основными для вычисления кривых пропускания светофильтров при цветной съемке. Поясним это на примере.

Допустим, мы имеем репродукционный аддитивный процесс (например, метод трех проекций Максвелла), причем цвета фильтров, употребляемых при проекции, обозначим через A_1, A_2, A_3 . Покажем, что точное решение

задачи цветоделения в данном случае мы имели бы, если бы взяли такие светофильтры, чтобы произведения их кривых пропускания на спектральную чувствительность эмульсии давали бы кривые сложения для системы единичных цветов A_1, A_2, A_3 , то есть функции $a_1(\lambda), a_2(\lambda), a_3(\lambda)$.

Пусть от какого-либо места оригинала исходит излучение с распределением энергии $E_1(\lambda)$. Чтобы получить тот же цвет на репродукции, мы должны смешать аддитивно три цвета A_1, A_2, A_3 в некоторых количествах: m_1, m_2, m_3 . Согласно свойствам кривых смешения эти количества равны:

$$\left. \begin{aligned} \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \cdot a_1(\lambda) d\lambda &= m_1 \\ \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \cdot a_2(\lambda) d\lambda &= m_2 \\ \int_{380}^{730} E_1(\lambda) \cdot a_3(\lambda) d\lambda &= m_3 \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

где $a_1(\lambda), a_2(\lambda), a_3(\lambda)$ являются кривыми сложения, определенными относительно системы единичных цветов A_1, A_2, A_3 .

Если наши светофильтры удовлетворяют только что поставленному нами условию, то величины m_1, m_2, m_3 , как они определяются из формул (6.12), будут представлять собой величины прореагировавших в эмульсионном слое количеств лучистой энергии, определяющих плотно-

сти негатива (т. е., если можно так выразиться, выражают плотности негатива в энергетических единицах). Если каждый из этих негативов превратить в диапозитивы так, чтобы коэффициент пропускания диапозитива был бы пропорционален количеству прореагировавшей при съемке энергии (обычное требование для черных изображений), а затем, пропустив через эти диапозитивы три излучения A_1 , A_2 , A_3 , совместить все три изображения вместе, то полученная репродукция будет идеально точной в физиологическом смысле. Таким образом, мы могли бы достигнуть максимальной точности цветопередачи, на какую принципиально способны трехцветные методы. Эта точность будет такова, что зритель не в состоянии визуально отличить оригинал от его изображения.

Замечательно, что это блестящее решение проблемы цветной репродукции было дано еще Максвеллом [2], который не мог осуществить его на практике из-за отсутствия в его время нужных сенсбилизаторов. Осуществлявшие впоследствии цветную репродукцию по методу Максвелла (например, Айве) не поняли его основной идеи и вместо того, чтобы выбирать кривые светофильтров *в зависимости от того, каковы были цвета, употреблявшиеся при проекции*, брали те или иные готовые кривые сложения, определенные для совершенно других цветов.

Так, например, Айве пользовался кривыми чувствительности глаза, представляющими собой кривые сложения для так называемых основных физиологических цветов, заведомо неосуществимых на практике. Иногда ссылаются на кривые, данные Максвеллом и вычисленные относительно трех монохроматических излучений. Эти кри-

вые будут давать решение вопроса *только в том случае, если для синтеза изображения применять те самые монохроматические излучения, для которых они рассчитаны.* Если, как обычно бывает, для проекции пользуются светофильтрами, то кривые сложения должны быть вычислены заново. Таким образом, хотя аддитивные методы, как известно, дают наилучшую цветопередачу, никто до сих пор еще не проводил такую репродукцию правильно и то, что мы обычно видим, еще далеко не то, что можно получить при правильном ведении процесса. Это тем более досадно, что всё произошло только из-за непонимания гениальной работы, написанной еще раньше, чем цветная репродукция стала осуществимой практически.

Здесь уместно указать на тот вред, который приносит цветной фотографии упорное стремление большинства теоретиков отыскивать какие-то «истинные» или «абсолютные» основные цвета, которыми только якобы и возможно осуществить цветную репродукцию. Надо твердо усвоить, что с точки зрения тех явлений, которые имеют значение для цветной репродукции, любые три цвета, из которых ни один не может быть получен смешением двух других, с одинаковым правом могут быть взяты за «основные».

Единственно, в каком отношении выбор этих цветов (при аддитивной репродукции) имеет смысл, это возможность получения из них смешением других цветов, причем и здесь не существует единственного решения, так как решительно всех цветов нельзя получить ни при каких трех исходных. Кроме того, само стремление получить по возможности все цвета не является решающим, так как наи-

26

лучшими в этом отношении являются, во всяком случае, цвета трех монохроматических излучений, использование которых бывает обычно неудобным по техническим причинам [2].

При субтрактивных методах вопрос несколько сложнее, но и там не может быть и речи о том, чтобы остановиться на каких-то наивыгоднейших во всех отношениях цветах (собственно говоря, в этих случаях надо говорить уже не о цветах, а о красках).

Единственно правильный в теоретическом отношении путь заключается в том, чтобы максимально приспособить аналитический процесс к трем краскам или цветам, которыми пользуются для синтеза. В отношении возможностей такого приспособления бывают случаи, когда его можно провести полнее, или приспособление оказывается делом более трудным. Анализ различных конкретных случаев может помочь нам остановить свой выбор на тех или иных красках, однако принципиальной разницы выбор красок не представляет, и для любых красок метод расчета остается всегда одним и тем же.

Замечательно, что такая постановка вопроса облегчает ведение цветной репродукции с чисто практической точки зрения, так как позволяет учесть любые особенности фактического процесса вместо голого предъявления технически неосуществимых требований.

Возвратимся теперь к результатам доказанной выше теоремы аналитического процесса, обеспечивающей независимость от спектрального состава.

Сравнивая формулу (6.3) с формулами (6.9), мы убеждаемся, что в цветной репродукции светофильтры должны

всегда выбираться так, чтобы функция спектральной чувствительности $p(\lambda)$ принадлежала к числу кривых сложения. Так как мы делаем три съемки через различные светофильтры, то аналитический процесс в целом характеризуется тремя кривыми, взятыми из числа кривых сложения. Так как три кривых сложения в свою очередь определяют три соответствующих им единичных цвета, то можно сказать, что выбор аналитического процесса эквивалентен выбору трех цветов, которые можно было бы назвать основными, помня, однако, что они будут меняться от случая к случаю. Мы будем пользоваться, однако, другим термином, называя три таких цвета системой единичных цветов, сопряженной данному аналитическому процессу.

Таким образом, мы получаем еще один вывод из нашей теоремы.

Фотографированием через три светофильтра с соблюдением условия независимости от спектрального состава мы всегда получаем цветоделение, являющееся точным решением задачи для аддитивного синтеза трех цветов, сопряженных избранному аналитическому процессу. Цветоделение при иных (субтрактивных) методах синтеза возможно лишь постольку, поскольку эти методы могут быть сведены к аддитивному (например, путем приближенного рассмотрения субтрактивного смешения как последовательного вычитания трех цветов) [2].

6.4. Характеристика синтетического процесса

Условие, выраженное формулой (6.3), есть единственное условие, общее для любых методов ведения трехцветного репродукционного процесса. В самом деле, как только что было показано, любая из кривых сложения, вообще говоря, может давать решение задачи цветоделения при надлежащем выборе синтезируемых цветов. Поэтому выбор той или иной кривой сложения в качестве кривой спектральной чувствительности $p(\lambda)$ может быть сделан только исходя из свойств того конкретного случая синтеза изображения, которым мы пользуемся. Это заставляет нас обратиться к анализу синтетического процесса и указать способы исчерпывающей характеристики любого синтетического процесса независимо от того, является ли он аддитивным, субтрактивным или каким бы то ни было иным.

Во всяком трехцветном синтезе мы имеем три численных параметра, независимых друг от друга, значениями которых взаимно однозначно определяется цвет, получаемый в результате синтеза. Мы не будем сейчас входить в рассмотрение, каковы эти параметры, выражают ли они количества трех красок или яркость трех излучений, в какой системе единиц выражены их численные значения, определяем ли мы количество краски по весу, или по толщине слоя, или как-либо иначе, это для нас сейчас неважно. Существенно лишь то, что независимых параметров три, что они определяют синтезируемый цвет взаимно однозначно, и что значение каждого из параметров в отдельно-

сти по всей плоскости изображения определится распределением плотностей на одном, соответствующем ему, негативе.

Согласно нашей формулировке задачи цветоделения для нас особенно важно знать, какие цвета будут получаться при постоянном значении одного из параметров и любых значениях двух других, так как для всех таких цветов мы должны стараться получить на негативе одинаковые плотности.

Будем давать нашим трем параметрам различные значения и отмечать в цветовом пространстве цвета, соответствующие этим значениям параметров. Дадим сначала двум из параметров некоторые постоянные значения, и будем непрерывно изменять третий параметр. Так как при этом цвет будет изменяться непрерывно, то полученный ряд оттенков расположится в пространстве вдоль какой-то линии, вообще говоря, кривой. Если мы оставим первый параметр прежним и, изменив немного значение второго параметра, опять будем давать третьему всевозможные значения, мы получим в цветовом пространстве новую кривую, лежащую вблизи первой. Продолжая давать второму параметру всё новые и новые значения, мы получим целое семейство кривых в пространстве, которые в своей совокупности опишут некоторую цветовую поверхность. Эта цветовая поверхность есть геометрическое место всех цветов, которые получают при заданном значении первого параметра. Поверхность состоит из кривых линий, соответствующих постоянным значениям двух первых параметров и переменным значением третьего. Ту же поверхность мы могли бы получить, давая последовательно

30

то или иное постоянное значение третьему параметру и всевозможные значения второму, оставляя за первым его прежние постоянные значения. В этом случае та же самая поверхность получится из новой серии кривых, пересекающих серию кривых, полученную ранее.

Для любого значения первого параметра можно аналогичным путем построить соответствующую цветовую поверхность. Эти поверхности, вообще говоря, будут кривыми и притом могут для различных постоянных значений первого параметра иметь несколько различную форму, в частности, они не будут обязательно параллельными друг другу, хотя и не будут нигде пересекаться (иначе одни и те же цвета можно было бы получить при различных значениях параметров). Так как во всяком синтетическом процессе параметры изменяются в известных конечных пределах, то построенные поверхности, собственно говоря, будут только кусками поверхностей, ограниченных со всех сторон, и все они вместе будут заполнять известную часть цветового пространства. Эта часть пространства будет, очевидно, областью тех цветов, которые принципиально могут быть получены при данном синтетическом процессе. Ограниченность этой области является отражением факта ограниченности наших возможностей получения различных цветов смешением данных трех красок (или излучений) [3].

Ту же самую область мы можем получить, заполняя ее другим семейством поверхностей, соответствующих постоянным значениям второго параметра, или третьим семейством, построенным для третьего параметра. Эти поверхности, очевидно, будут пересекаться между собой по

тем самым кривым линиям, из которых мы строили каждую из поверхностей, так как такая кривая линия соответствует постоянным значениям двух параметров и, следовательно, принадлежит одновременно одной поверхности одного семейства и другой поверхности другого семейства.

Можно, наряду с тремя свойствами поверхностей, рассматривать три семейства кривых линий. Каждая кривая одного и того же семейства характеризуется некоторыми постоянными значениями двух определенных параметров при переменных значениях третьего. На рис.6.3 показано пространство с криволинейными координатами.

Обозначая параметры через u , v , w , мы будем иметь три семейства поверхностей:

$u = \text{const}$ — для первого,

$v = \text{const}$ — для второго,

$w = \text{const}$ — для третьего,

или три семейства кривых линий в пространстве:

$v = \text{const}; w = \text{const}$ — для первого, u — переменное,

$w = \text{const}; u = \text{const}$ — для второго, v — переменное,

$u = \text{const}; v = \text{const}$ — для третьего, w — переменное.

Такие три семейства поверхностей и семейства пространственных кривых, удовлетворяющих тому условию, что через каждую точку данной пространственной области проходит по одной поверхности каждого семейства и по одной кривой каждого семейства, носят в дифференциальной геометрии название криволинейных координат пространства. Действительно, для каждой точки данной области мы можем указать те три постоянные значения параметров, при которых поверхность соответствующего се-

мейства проходит через данную точку. Эти три постоянные значения вполне определяют точку, а потому могут рассматриваться как ее координаты [2].

В нашем случае синтеза цветов мы можем, таким образом, рассматривать для любого цвета, который может быть синтезирован, в качестве его «криволинейных координат» те количества трех красок, которые необходимы для синтеза этого цвета.

В частном случае прямолинейных координат пространства, семейства поверхностей $u = \text{const}$, $v = \text{const}$, $w = \text{const}$ превращаются в семейства плоскостей, параллельных плоскостям, связывающих попарно координатные оси. Семейства линий будут, очевидно, семействами прямых, параллельных координатным осям.

Прямолинейную систему координат мы будем иметь при аддитивном синтезе (ведь таким образом мы и строим самое цветовое пространство), во всех же других случаях синтеза мы будем иметь дело, вообще говоря, с системой координат, криволинейной в собственном смысле слова.

Криволинейная система цветовых координат дает в наглядной форме связь между значениями переменных факторов синтеза и получаемым цветом, то есть дает полную характеристику синтетического процесса во всей его практической конкретности. Мы умышленно допускали, что связь между переменными факторами синтеза и цветом совершенно произвольная, чтобы заранее не связывать себя теми или иными закономерностями смещений, которые на практике могут быть часто сильно искажены теми или иными побочными явлениями. Единственно, что мы предполагали,— это стандартность процесса синтеза (одно-

значное соответствие между цветом и переменными факторами), так как вне известной стандартности процесса вообще никакой предварительный расчет невозможен [2].

Таким образом, в самом общем виде мы можем сказать, что любой конкретный случай синтеза цветных изображений может быть охарактеризован как некоторая криволинейная система координат цветового пространства. Если мы будем считать, что криволинейная система координат может быть какой угодно, то под наше определение попадут не только все встречающиеся в настоящее время случаи трехцветного синтеза, но и все случаи, которые когда-либо могут появиться в будущем.

В каждом конкретном случае мы можем путем прямого эксперимента с любой желательной нам степенью точности найти криволинейную координатную систему, характеризующую данный синтетический процесс. Для этой цели мы должны составить первым делом специальную цветную таблицу, выполненную следующим образом.

Возьмем в качестве негативов три серых фотографических ступенчатых клина. Число ступеней клина зависит от того, с какой точностью мы желаем определить нашу криволинейную координатную систему. Из этих трех серых клиньев делаем, принятым в процессе путем три цветных клина, выполненных теми самыми красками, которые применяются для синтеза. Полученные цветные клинья, скрестив их между собой, синтезируем в многоцветное изображение, точно придерживаясь всех конкретных условий избранного метода синтеза. Чтобы получить сочетания всевозможных плотностей красок между собой, ступенча-

тым клиньям можно придать следующую форму (см. схему рис. 6.4.) [2].

Цветовая таблица, полученная в результате синтеза (на каждом из 27 полученных полей проставлены буквы, указывающие плотности по трем краскам) приведена на рис. 6.4.

Как видно из рис. 6.4, все три клина имеют форму квадрата, разделенного на полосы различной плотности (на схеме три плотности), причем на первом клине полосы вертикальные, на втором горизонтальные, а на третьем клин повторен в виде более узких полос столько раз, сколько ступеней плотности мы желаем обследовать.

Если промерить на колориметре цвета полученной таблицы и нанести соответствующие точки в цветовом пространстве, мы получим ряд точек, определяющих искомую систему криволинейных координат. В изображенном на схеме примере мы характеризуем криволинейную координатную систему тремя поверхностями каждого из трех координатных семейств (всего 9 поверхностей), причем каждую из поверхностей придется интерполировать по девяти точкам. Так, например, поверхность первого семейства $u = a_1$ характеризуется девятью цветами, расположенными в трех левых узких вертикальных полосах сборной таблицы, т. е. там, где плотность по первой краске равна a_1 .

Подобная таблица может быть использована и для контроля всего процесса воспроизведения со значительно большим успехом, чем применяемые обычно контрольные цветовые таблицы. Отличие нашей таблицы от этих по-

следних заключается в том, что она выполнена теми самыми красками и с соблюдением всех конкретных условий, которые используются при изготовлении цветного изображения в процессе производства. На снимке, сделанном с такой таблицы, можно не только качественно оценить общее впечатление от полученной цветопередачи, но оценить любую из ошибок количественно и легко вскрыть причины ее возникновения. Так, например, при идеальном процессе мы должны были бы, фотографируя таблицу, получить на негативах те самые три серых клина, которые послужили для ее изготовления, поэтому, сравнивая фактически полученные негативы с этими клиньями, мы можем определить все погрешности каждого из негативов в отдельности и, если это нужно, даже охарактеризовать их количественно. Фотографируя таблицу, можно установить также, какие ошибки цветопередачи происходят за счет ошибок цветоделения, а какие за счет неправильно выбранной гаммы или вообще неправильностей характеристической кривой.

Задача цветоделения, как мы уже упоминали, заключается в получении равных плотностей для тех цветов, которые требуют одинакового количества красок. Способ изготовления таблицы дает нам целые серии цветов, полученных при постоянном количестве той или иной краски, что позволяет судить о качестве цветоделения независимо от того, правильно подобрана шкала плотностей или нет. Так, например, при идеальном цветоделении мы должны получить на первом негативе три широкие вертикальные полосы равной плотности. Фактически равенства плотностей в пределах каждой полосы мы иметь не будем, это и будут ошибки цветоделения. Наоборот, беря отношение плотностей соответственных участков первой и последней полос,

мы можем охарактеризовать качество избранной шкалы плотностей.

Что касается оценки цветоделения, то фотографирование таблицы позволяет оценить, насколько хорошо удалось отделить одну краску от каждой из двух других в отдельности. Для этого полезно ввести следующие понятия. Назовем основным контрастом контраст на негативе между цветами, различающимися только количеством первой краски (например, при выделении первой краски контраст между полями a_1, b_1, c_1 и a_3, b_1, c_1), (конечно, этот контраст будет зависеть от того, как были выбраны поля). Контраст на негативе между полями с одинаковым количеством первой краски назовем контрастом искажений. Этот контраст искажений можно оценить в отдельности по каждой из других красок: так, например, контраст на первом негативе между полями a_1, b_1, c_1 и a_1, b_3, c_1 будет контрастом искажений первой краски по отношению ко второй. Наоборот, контраст между полями a_1, b_1, c_1 и a_1, b_1, c_3 будет контрастом искажений первой краски по отношению к третьей. Отношение контрастов искажений к основному контрасту даст характеристику качества цветоделения.

В рассмотренном примере всюду определялся контраст по отношению к плотности поля a_1, b_1, c_1 . Если его определять по отношению к какому-то другому месту таблицы, величины искажений получились бы несколько иными. Это связано с тем, что искажения для различных цветов при съемке могут быть различными: одни искажаются мало, другие сильно.

6.5. Цветоделение при субтрактивном синтезе

При аддитивных методах синтеза система криволинейных координат превращается в обыкновенную прямолинейную (скорее косоугольную) систему. Семейства поверхностей $u = const$, $v = const$, $w = const$ будут тремя семействами параллельных плоскостей. Каждая такая плоскость является геометрическим местом цветов, требующих для синтеза одинаковое количество одного из синтезируемых аддитивно излучений.

Если кривые чувствительности эмульсии с соответствующими фильтрами при трех съемках $p_1(\lambda)$, $p_2(\lambda)$, $p_3(\lambda)$ удовлетворяют условию (6.3), т.е. являются кривыми сложения, то они, как было сказано, выполняют задачу идеального цветоделения для аддитивного синтеза трех цветов, соответствующих этим кривым сложения. На основании этого можно сделать следующий важный вывод:

Если выполнено условие (6.3), то геометрическое место всех цветов, дающих на каком-либо одном негативе одинаковые почернения, будут всегда представлять собой семейства параллельных друг другу плоскостей цветового пространства. Так как невыполнение условий (6.3) неминуемо влечет за собой неоднозначность цветопередачи, то полученное условие является основным условием, характеризующим наши возможности в выборе того или иного аналитического процесса.

Выбор коэффициентов равенства (6.3), т.е. выбор той или иной кривой сложения, эквивалентен выбору в цветовом пространстве направления плоскостей, в которых лежат цвета, дающие на негативе одинаковые почернения.

Отсюда ясно, что только выбрав все три кривые чувствительности (т.е. все три семейства плоскостей), можно указать сопряженную систему единичных цветов, которые определяются как направление линий пересечения выбранных плоскостей.

Выбор направления этих плоскостей зависит таким образом от нашего желания, поэтому задача цветоделения для любого трехцветного процесса сводится к математической задаче аппроксимации семейства непересекающихся поверхностей той или иной формы семейством параллельных плоскостей. Расстояние между соответственными точками поверхности и аппроксимирующей эту поверхность плоскостью будут характеризовать искажения цветопередачи. Если поверхности семейства, характеризующие синтетический процесс, имеют меньшую кривизну и более или менее приближаются к семейству параллельных плоскостей, цветоделение может быть выполнено более совершенно. Если кривизна поверхностей велика, то неизбежные ошибки цветоделения будут тоже весьма значительны [2].

Как было сказано выше, идеальный случай семейств параллельных плоскостей мы имеем при аддитивных методах синтеза изображения. Для субтрактивного смешения этого, вообще говоря, не будет, а потому для нас особенно важно выяснить, при каком выборе красок для субтрактивных методов воспроизведения эти поверхности более или менее приближаются к плоскостям.

Первое бросающееся в глаза различие между аддитивным и субтрактивным смешением заключается в том, что, при увеличении количества синтезируемого в аддитивных методах света повышается светлота результирующего цвета, а при субтрактивном смешении увеличение количества той или иной краски увеличивает поглощение, т.е. уменьшает количество света, попадающего в глаз, а вместе с тем и светлоту получаемого цвета. Это различие не имеет, однако, существенного значения, так как целиком зависит от того, как мы выбираем параметры, характеризующие соотношения синтезируемых элементов.

В аддитивных процессах обычно мы имеем три черных изображения со стоящими перед ними светофильтрами и обычно характеризуем тот или иной полученный цвет яркостями трех слагаемых излучений, т.е. параметрами являются коэффициенты пропускания на трех черных изображениях. При этом, в частности, нулевым значениям всех трех параметров соответствует полное отсутствие света, т.е. черный цвет, а максимальным их значениям - цвет максимальной яркости, принимаемый за белый. Но с одинаковым правом можно характеризовать каждый из получаемых при аддитивном синтезе цветов коэффициентами поглощения или же плотностями на трех черных изображениях. Тогда с увеличением новых параметров (плотностей черных изображений) количество света, как и при субтрактивном смешении, будет уменьшаться. В этом случае весь процесс аддитивного синтеза можно рассматривать так: при минимальных значениях всех трех плотностей мы имеем белый цвет. Увеличение плотности первого изображения вычитает из этого белого цвета один из цве-

тов, служащих для синтеза в количестве, пропорциональном увеличению коэффициента поглощения. Точно так же плотности на двух других позитивах дают количества, вычитаемого из белого цвета, второго и третьего цветов. Вычитание цветов в данном случае не является только образным выражением, а является действительно вычитанием соответствующих цветовых векторов вектора белого цвета.

Субтрактивное смешение тоже часто называют вычитанием цветов (отсюда происходит и его название), подчеркивая однако, что здесь мы имеем дело с образным выражением. Рассмотрим, в какой мере это выражение соответствует действительному положению вещей.

Предположим, мы имеем какое-то излучение, проходящее через слой, обладающий определенным избирательным поглощением. При прохождении слоя часть света задерживается главным образом из-за поглощения, оставшийся свет попадает в глаз и вызывает то или иное цветовое ощущение. Функция распределения энергии прошедшего света является разностью функций распределения энергии падающего света и функции распределения задержанной слоем лучистой энергии. Поэтому в данном случае можно сказать, что цвет прошедшего через слой света будет разностью цветов падающего и задержанного слоем света, и это будет совершенно точным выражением. Таким образом, цвет какого-либо светофильтра в условиях белого освещения можно рассматривать как разность белого цвета и цвета, задержанного фильтром света. Этот задержанный свет будет, очевидно, цветом, дополнительным к цвету фильтра.

Однако цвет задержанного фильтром света зависит не только от свойств самого фильтра, но также и от спектрального состава света, падающего на фильтр. Более того, при увеличении толщины фильтра (если фильтр не рассеивает света) кривая поглощения изменяется согласно закону Бера для каждой длины волны в отдельности, т.е. изменяется по форме (пропускание становится более избирательным). Поэтому даже при одном и том же освещающем источнике увеличение поглощающего слоя не просто увеличивает поглощение, но одновременно изменяет относительный спектральный состав поглощенного света. Если белый свет проходит последовательно несколько различно окрашенных сред, получаемый цвет можно рассматривать как результат последовательных вычитаний из белого цвета тех потоков лучистой энергии, которые задержаны каждым из фильтров. Это будет совершенно точным, если только мы учтем, что цвет, вычитаемый каждым из фильтров, зависит не только от свойств самого фильтра, но и от того, каковы были поглощения в первых двух фильтрах.

Таким образом, субтрактивное смешение трех красок можно рассматривать совершенно строго как последовательное вычитание из белого цвета трех цветов. Однако вычитаемый той или иной краской цвет не будет оставаться всегда одним и тем же по цветовому тону и насыщенности, а будет изменяться в зависимости от количества этой и двух других красок. Характеризуя аддитивное смешение при помощи трех диапозитивов, мы тоже имели вычитание из белого цвета трех цветов. Но при аддитивном смешении цвет, вычитаемый из белого плотностью одного из негативов, совершенно не зависит от плотностей на соответст-

вующих местах двух других диапозитивов. При различных плотностях одного и того же диапозитива вычитаемый ими цвет отличается только по яркости, так как эти плотности вызывают только различное ослабление одного и того же излучения, участвующего в синтезе.

Возьмем какой-либо цвет, соответствующий каким-либо плотностям трех черных диапозитивов аддитивного синтеза, и отметим соответствующую ему точку цветового пространства. Увеличивая плотность на одном из диапозитивов и оставляя плотности на двух других неизменными, мы будем получать новые цвета, лежащие на прямой линии, параллельной вектору, изображающему цвет соответствующего проекционного фильтра аддитивного синтеза. Так как этот вычитаемый цвет остается все время неизменным, то семейства линий (например, $u = const, v = const$), характеризующих аддитивный синтез, оказываются семействами параллельных прямых, а поверхности (например, $u = const$) – параллельных плоскостей.

Рассмотрим цвет субтрактивной смеси как функцию трех переменных параметров синтеза u, v, w . Обозначая координаты цвета по отношению, хотя бы системы координат через x, y, z , можно записать характеристику субтрактивного синтеза в виде [5]:

$$x = f_1(u, v, w); y = f_2(u, v, w); z = f_3(u, v, w). \quad (6.13)$$

Полагая в (6.13) значения какого-либо одного из параметров постоянным, и исключив из трех уравнений (6.13) два других параметра, можно получить уравнения рассмотренных выше кривых поверхностей, характеризую-

щих синтез. Пологая постоянными два параметра, получаем уравнения кривых линий (линий пересечения этих поверхностей).

Пусть $u = u_0, v = v_0, w = w_0$, а затем дадим одному из них, например u , некоторое малое приращение Δu_1 и рассмотрим, как при этом изменится соответствующий цвет. Координаты нового цвета:

$$\begin{aligned}x + \Delta_1 x &= f_1(u_0 + \Delta u_1, v_0, w_0); \\y + \Delta_1 y &= f_2(u_0 + \Delta u_1, v_0, w_0); \\z + \Delta_1 z &= f_3(u_0 + \Delta u_1, v_0, w_0).\end{aligned}$$

Так как увеличение количества краски уменьшает яркость цвета, то величины $\Delta_1 x, \Delta_1 y, \Delta_1 z$ будут отрицательными. Соответствующие положительные величины будут, очевидно, компонентами цвета, добавочно вычтенного из белого при увеличении плотности u_0 на Δu . Если Δu очень мало, то компоненты добавочного вычитаемого цвета:

$$\Delta_1 x : \Delta_1 y : \Delta_1 z = \left[\frac{\partial f_1}{\partial u} \right] : \left[\frac{\partial f_2}{\partial u} \right] : \left[\frac{\partial f_3}{\partial u} \right].$$

Иначе говоря, направление касательной и кривой $v = v_0, w = w_0$ в точке $u = u_0$ определяет направление цветового вектора, добавочно вычитаемого первой краски при увеличении ее количества, когда наличное количество трех красок равно u_0, v_0, w_0 .

Можно ли осуществить такой субтрактивный синтез, при котором вычитаемый каждой краской цвет оставался

всегда одним и тем же? В полной мере это возможно только при соблюдении следующих условий:

а) Области поглощения трех красок не должны перекрываться, т.е. все длины волн, которые скольконибудь значительно поглощаются одной из красок, не должны заметно поглощаться двумя другими (обеспечивает параллельность и подобие поверхностей $u = const, v = const, w = const$).

б) В пределах области поглощения каждой из красок поглощение для всех длин волн должно быть одинаковым (обеспечивает прямолинейность кривых

$u = const, v = const$ и т.д.).

в) Области поглощения трех красок должны в сумме покрывать весь спектр.

Все эти требования должны быть соблюдены для всех тех длин волн видимого спектра, которые входят в состав света проекционного источника.

6.6. Формулы цветовых различий

В четвертой главе было показано, что существующие цветовые пространства не обладают однозначностью измерений цветовых различий, т.е. величина пороговых изменений цветностей в них зависит от области на цветовом пространстве (от значения сравниваемых цветов), поэтому для цветовых различий ни одно из имеющихся цветовых пространств не отвечает на 100% поставленной задаче. Но, тем не менее, формула цветового различия MКОLab (или MКО-76) стала одной из двух первых формул, рекомендо-

ванных МКО в качестве единой меры воспринимаемого различия. Однако, как уже говорилось, попытки ее использования для разбраковки по цвету показали необходимость дальнейшего уточнения. Сама по себе оценка надежности формул цветового различия представляет сложную проблему. Так Луо и Риг [3] использовали пять характеристик для сравнительной оценки точности формул цветового различия. Однако, в первом приближении, одной из характеристик пригодности формул для разбраковки по цвету является процент ошибочных решений. Исследования Мак Дональда [36] показали, что формула ANLAB 40, упрощением которой является формула цветовых различий MKOLab, дает приблизительно 20% ошибочных решений, в то время как визуальные оценки разбраковщиков - только 17%. Т.о. недостатки метрики MKOLab вскоре обнаружили с очевидностью и потребовали ее уточнения. Первой модификацией MKOLab, нашедшей широкое промышленное применение в разбраковке по цвету, стала формула JPC 79, задаваемая следующими соотношениями:

$$DE_{jpc-79} = \sqrt{\left[\left(\frac{DL}{L_t} \right)_2 + \left(\frac{DC}{C_t} \right)_2 + \left(\frac{DH}{H_t} \right)_2 \right]} \quad (6.14)$$

где: $L_t = \frac{0,08195 \times L_1}{1 + 0,01756 \times L_1},$

$$C_t = \frac{0,0638 \times C_1}{1 + 0,0131 \times C_1} + 0,638,$$

$$H_t = T \times C_t.$$

если $C_t < 0,638$ то $T=1,$

иначе: $T=0,36+|0,4 \cos(q_1 + 35)|$ для $345 < q_1 < 164$,
и $T=0,56+|0,2 \cos(q_1 + 168)|$ для $164 < q_1 < 345$.

DL, DC, DH – различие между эталонным и испытуемым образцами по светлоте, насыщенности и цветовому тону соответственно, вычисленное по формуле MКОLab76;

L1, C1, q1 – относятся к эталонному образцу.

Принципиальным отличием формулы JPC 79 от формулы MКОLab76 стало то, что путем введения в формулу масштабирующих коэффициентов – Lt, Ct, Ht задали изменение допуска по светлоте при изменении светлоты стандарта, по насыщенности при изменении насыщенности стандарта и изменение допуска по цветовому тону в зависимости от насыщенности. Хотя общий вид формулы JPC 79 похож на формулу, определяющую евклидово расстояние в трехмерном пространстве, цветовое различие, вычисленное по JPC 79, строго говоря, не может быть интерпретировано как геометрическое расстояние между точками некоторого цветового пространства. Это обусловлено тем, что шкалы цветового тона и насыщенности в формуле JPC 79 перестали быть взаимно независимыми. Таким образом, различие, вычисленное по JPC 79, утратило наглядность интерпретации, какой обладало различие по MКОLab76. Конкретный вид шкалирующих множителей в формуле JPC 79 определен при выполнении оценок приемлемости цветовых различий швейных ниток. Если $DE_{jpc-79}=1$, то это означает, что вероятность принятия образца при достаточно большом числе визуальных оценок равна 0,5 (50%). Таким образом, $DE_{jpc-79} < 1$ означает вероятность принятия образца 0,5 (50%). Ясно, что JPC 79

является формулой приемлемых, а не воспринимаемых различий. В формуле приемлемости отношение между компонентами общего цветового различия светлота (насыщенность) и цветовой тон получается из оценок, отражающих конъюктуру рынка, в то время как в формуле для воспринимаемых различий отношение этих компонент должно быть фиксированным. Формула, шкалированная по воспринимаемым различиям, была бы более универсальной. Разработка такой формулы была осуществлена Комитетом по колориметрии Королевского общества красильщиков и колористов (СМС) на основе JPC-79. В результате получили формулу СМС, определяемую соотношениями (6.15):

$$DE_{cmc} = \left(\left(\frac{DL}{S_1} \right)_2 + \left(\frac{DC}{cS_c} \right)_2 + \left(\frac{DH}{Sh} \right)_2 \right)_{1/2} \quad (6.15)$$

где $S_1 = 0,040975L_1 / (1 + 0,01756 L_1)$, если $L_1 < 16$, то $S_1 = 0,511$;

$$S_c = 0,0638C_1 / (1 + 0,0131 C_1) + 0,638;$$

$$Sh = S_c(Tf + 1 - f); f = \{(C_1)^4 / [(C_1)^4 + 1900]\}^{1/2},$$

$$T = 0,36 + |0,4 \cos(q_1 + 35)| \text{ для } 345 < q_1 < 164;$$

$$\text{и } T = 0,56 + |0,2 \cos(q_1 + 168)| \text{ для } 164 < q_1 < 345;$$

DL, DC, DH – различия между эталонным и испытуемым образцами по светлоте, насыщенности и цветовому тону соответственно, вычисленные по формуле CIE Lab76;

L1, C1, q1 – относятся к эталонному образцу.

Общий вид формул JPC 79 и СМС ($l:c$) отличается тем, что в последнюю введены изменяемые множители l и c ,

которые обозначают отношение весов светлоты к насыщенности и цветовому тону и позволяют использовать формулу для расчета как воспринимаемых, так и приемлемых цветовых различий. В формуле СМС (Ес) зависимость шкалы цветового тона от насыщенности стала еще более сложной. Широкие промышленные испытания показали, что формула СМС (Ес) гораздо лучше коррелирует с визуальными оценками приемлемых и воспринимаемых малых и средних цветовых различий, чем МКОLab76, и оценка по СМС (Ес) надежнее, чем оценка каждого отдельного наблюдателя. В результате формула СМС (*l:c*) принята как стандарт оценки общего цветового различия в Великобритании, США и ISO. Однако она наследует недостаток формулы JPC 79, а именно, она не дает наглядной интерпретации общего цветового различия, так как не связана с евклидовым цветовым пространством. Хотя формула СМС (*l:c*) подразделяет общее цветовое различие на три компоненты – светлости, насыщенности и цветового тона, она не позволяет, как МКОLab76, определить, например, в какую сторону отличается конкретный образец от эталона - в синеву или в желтизну. Для этого по-прежнему приходится использовать формулу и пространство МКОLab. Следующей попыткой улучшить формулу СМС (*l:c*) стала формула BFD, опубликованная в 1987 г. Имея более сложную по сравнению с формулой СМС структуру, она не вносит в определение цветового различия ничего принципиально нового и дает незначительное улучшение согласованности с визуальными оценками. Видимо, в силу этих причин она не нашла пока широкого применения.

Похожую с СМС (*l:c*) структуру имеет формула цветового различия, рекомендованная в 1994 году МКО, но в отличие от нее использует простую линейную зависимость от насыщенности для получения значений Sc и Sh:

$$DE_{CIE94} = \left(\left(\frac{DL}{k_l S_l} \right)_2 + \left(\frac{DC}{k_c S_c} \right)_2 + \left(\frac{DH}{k_h S_h} \right)_2 \right)_{1/2} \quad (5.16)$$

где $S_l=1$; $S_c=1+0,045C1$;

$S_h=1+0,015C1$;

CIELab76;

C1– относятся к эталонному образцу.

В этом соотношении также DL, DC, DH – различия между эталонным и испытуемым образцами по светлоте, насыщенности и цветовому тону соответственно, вычисленные по формуле, включает в себя три весовых параметра k_l , k_c , k_h для светлоты, насыщенности и цветового тона соответственно. При этом для оценки текстиля на соответствие цветовому допуску рекомендуется $k_l=2$, $k_c =1$, $k_h =1$, хотя в общем случае при оценке цветового различия $k_l = k_c = k_h =1$. Предполагается, что точные значения этих параметров должны устанавливаться с учетом того, как фактура поверхности образца и другие факторы влияют на согласованность с визуальными оценками.

Всем перечисленным выше формулам присущ один общий недостаток – они сугубо эмпирические, и каждая из них отличается друг от друга в зависимости от использованного при ее выводе (оптимизации) экспериментального материала. Поэтому продолжают появляться новые формулы. В частности, ISO утвердила две формулы: формулу СМС для расчета цветовых различий и формулу, предло-

женную Швейцарской комиссией по испытаниям устойчивости окрасок, для оценки изменений цвета в испытаниях на устойчивость окрасок. Хотя, по сути, измерение малых цветовых различий и оценка изменений цвета при испытаниях устойчивости окраски – одна и та же задача.

Необходимо отметить, что данные формулы пригодны лишь при субтрактивном смешении цветов, т.е. эти формулы применимы в полиграфии, текстильной промышленности, фотографии и других подобных отраслях народного хозяйства, где объект цветового сравнения можно наблюдать лишь при внешнем освещении, а источник света можно и нужно установить стандартный и рекомендованный МКО, например D6500. В устройствах, где цветная репродукция получается за счет аддитивного сложения основных цветов, в устройстве воспроизведения (телевидение, экран монитора компьютера), эти формулы не пригодны, так как принципиально нельзя освещать репродукцию на экранах монитора или телевизора, или экранах воспроизведения кинофильмов.



Рис. 6.1. Последовательное наблюдение и восприятие изображения [3]



Рис. 6.2. Процесс аппаратно-независимого цветовоспроизведения. [3]

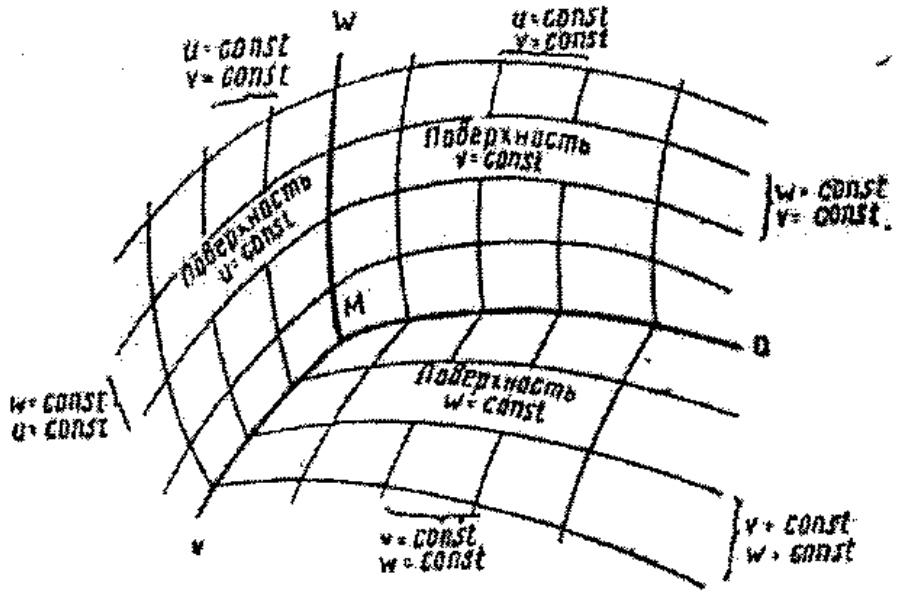
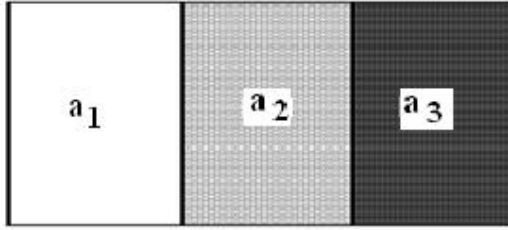
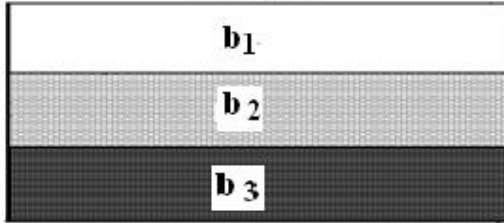


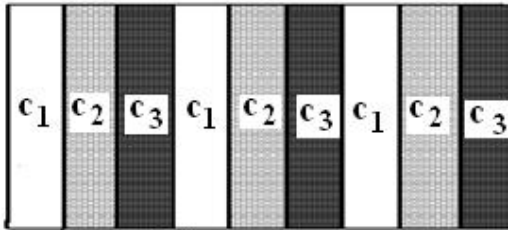
Рис. 6.3. Криволинейные координаты пространства



1-й клин



2-й клин



3-й клин

a_1	a_1	a_1	a_2	a_2	a_2	a_3	a_3	a_3
b_1	b_1	b_1	b_1	b_1	b_1	b_1	b_1	b_1
c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3
a_1	a_1	a_1	a_2	a_2	a_2	a_3	a_3	a_3
b_2	b_2	b_2	b_2	b_2	b_2	b_2	b_2	b_2
c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3
a_1	a_1	a_1	a_2	a_2	a_2	a_3	a_3	a_3
b_3	b_3	b_3	b_3	b_3	b_3	b_3	b_3	b_3
c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3	c_1	c_2	c_3

Рис. 6.4. Сборная цветовая таблица

7. Пороги цветоразличения

В начале сороковых годов Мак Адам провел серию экспериментов по определению порогов цветоразличения [6]. Результаты этих опытов известны как эллипсы Мак Адама (рис. 7.1).

Определение порогов цветоразличения глазом человека является достаточно сложной и трудоемкой задачей. Необходимость постановки самой задачи возникает из технических потребности верности цветовоспроизведения техническими средствами, в частности телевизионной системы.

В [6] Давид Мак Адам достаточно подробно описывает как техническую, так и методологическую стороны проведения этих опытов.

Для проведения подобных экспериментов автором этой монографии разработан специальный программный комплекс "Пороги цветоразличения", состоящий из двух независимых программных модулей, имеющих общую базу данных [7, 8]. Данный программный продукт разработан и реализован на платформе Microsoft Visual Studio с использованием базы данных Access. Приведем более подробное описание программного комплекса, структурная схема которого приведена на рис. 7.2.

Первая программа программного комплекса "Пороги цветоразличения" является непосредственно программа

экспериментального измерения порогов цветоразличения, а вторая – программа обработки результатов измерения.

Программа измерения порогов цветоразличения обеспечивает следующие режимы работы, которые меняются путем выбора соответствующих пунктов меню, как это показано на рис.7.3.

Как видно из этого рисунка, первым пунктом меню является пункт "регистрация". При выборе данного пункта появляется анкета (рис. 7.4), которую необходимо заполнить респондентом, производящим непосредственное измерение порогов цветоразличения.

Несколько слов о бланке регистрации. Как видно из рис. 7.4, в бланке существует графа – пол. Согласно публикациям в научной литературе, например [9], известно, что нарушение цветового восприятия у лиц мужского пола встречаются гораздо чаще, нежели у женщин. Тоже самое можно сказать о графе – возраст. Как известно, с возрастом человека зрение меняется, очевидно, что и цветовосприятие также может меняться. Поэтому на основании изложенного в бланк регистрации и добавлены эти две графы. Графы ФИО и дата регистрации позволяют различить результаты измерений при статистической обработке.

Далее, после регистрации респондента, можно переходить к осуществлению непосредственно к измерению порогов цветоразличения – пункт меню: "Подготовка эксперимента" (рис.7.3). Как видно из этого рисунка, в этом пункте содержится два подпункта, перейдем сразу ко второму "Вариант эксперимента". Этот пункт подразумевает два варианта опыта: 1 – угол зрения 2^0 и 2 – угол зрения 10^0 , т.е. наблюдение мелких и крупных элементов. В обоих

случаях может быть выбран цвет фона либо из таблицы базы данных, или цвет фона будет такой же, как и цвет, на котором производится измерение порогов цветоразличения. Предположим, мы выбрали угол зрения $2,0^\circ$ и цвет фона выбираем из таблицы базы данных, в этом случае получим следующее изображение на экране монитора (рис. 7.5).

Из списка возможных цветов фона выбираем желаемый цвет, предположим – серый. Тогда получим на экране серый цвет, как это показано на рис. 7.6.

Нажав кнопку ОК, программа перейдет на следующий шаг, в частности появится список, из которого выбирается фамилия респондента, после на экране монитора, заполненного выбранным цветом фона, появятся два прямоугольника одинакового цвета, и имеющие одну общую сторону. Внизу экрана виден регулятор в виде ползунка, с помощью которого можно поочередно менять, как в сторону увеличения, так и уменьшения, количества основных цветов излучения цветного экрана монитора. Эти изменения сказываются только на правом цветном прямоугольнике. На рис. 7.7. показаны эти изменения правого прямоугольника сравниваемых цветов (для наглядности разница цвета левой и правой частей прямоугольника увеличена).

Другими словами процесс измерения порогов цветоразличения заключается в сопоставлении едва различимого, но уверенного изменения двух ранее равных цветов, после чего с помощью кнопки (на рис. 7.7. она изображена красным цветом и обозначена, как R +) производится фиксация результатов измерения и смена направления изменения или смена регулируемого цвета). Этот процесс можно

пояснить с помощью рис. 7.8. На этом рисунке показаны на примере «белого» цвета W с координатами в системе МКО 1931 $x=y=1/3$ в увеличенном виде порогов цветоразличения.

Таким образом, можно измерить пороги цветоразличения для любого цвета, которые записаны в базе данных (- в реализованном варианте программного комплекса в базе данных записаны координаты 13 цветов, количество и координаты легко можно изменить непосредственно через СУБД Microsoft Access).

Программа реализована так, что измерения порогов цветоразличения можно производить при углах зрения 2^0 и (или) 10^0 , а также цвет фона можно установить равной цвету левого прямоугольника (рис. 7.7).

Поскольку качественные характеристики измерений, производимые данной программой, на прямую зависят от конкретного экрана монитора, то в программе предусмотрены некоторые опции. В частности, в пункте меню “Специальные функции” предусмотрено измерение таких важных с точки зрения колориметрии характеристик, как линейность световых характеристик основных цветов экрана монитора (гаммы), а также координат цветности основных цветов и их неравномерности по полю экрана. При этом используется дополнительная техника. Для измерения линейности световых характеристик применяется фотометр (люксметр), а для измерения координат цветности основных цветов экрана монитора используются показания колориметра.

Для измерения линейности световых характеристик используется ступенчатое изменение яркости свечения ос-

новых цветов экрана монитора. Так как цвет свечения экрана задается в программе в системе RGB, где R, G и B - количество соответственно красного, зеленого и синего цветов, а их значения могут меняться в диапазоне от 0 до FF (в шестнадцатеричном коде или от 0 до 255 – в десятичном коде). В данной программе, как уже говорилось выше, яркость меняется ступенчато с шагом 32 единицы (в десятичном коде), т.е для каждого основного цвета имеем по 8 ступенек яркости.

Каждая такая ступенька яркости измеряется фотометром, а результат измерения записывается ручным способом в соответствующие окна, формируемые программой по измерению всех восьми ступенек яркости, для каждого основного цвета программным путем рассчитывается гамма-характеристика, причем аппроксимация результатов измерения и самой гаммы-функции осуществляется методом наименьших квадратов.

На рис. 7.9 показаны полученные результаты измерения. Для наглядности на этом рисунке сами значения измерений яркости даны в произвольном виде.

Аналогично производятся колориметрические измерения координат цветности основных цветов экрана монитора с помощью колориметра в пяти точках экрана монитора. При этом поочередно экран засвечивается чистым красным, зеленым, а потом синим цветами, координаты которых измеряются с помощью колориметра, а результаты заносятся в специальные окна. Области экрана, где рекомендуется проводить колориметрические измерения, отмечены окружностями. Замеренные и вычисленные параметры экрана монитора заносятся в базу данных. Изме-

60

ренные параметры в базе данных помечаются как специальный тип монитора и используются перед процессом измерения порогов цветоразличения путем выбора из пункта меню "тип экрана монитора" (см. рис. 7.3.). В этом же пункте меню включены еще два подпункта:

- LCD типовой
- цветной кинескоп типовой (ЭЛТ)

Второй программой программного комплекса "Пороги цветоразличения" является программа "Обработка результатов измерения порогов цветоразличения". Ее назначением - это обработка результатов экспериментальных измерений порогов цветоразличения, проведенных предыдущей программой. Обе эти программы имеют общую базу данных с удаленным многопользовательским доступом.

Все входные данные для работы программного комплекса записаны в соответствующие таблицы базы данных. Причем база данных построена так, что выходные данные одной программы могут являться входными данными для другой программы, и в базе данных есть данные, которые являются входными данными для обеих программ, к ним можно отнести следующие:

- а). Координаты цветностей основных цветов экрана телеприемника;
- б). Светотехнические характеристики типовых экранов мониторов, в частности, гамма- характеристик;
- в). Исходные (опорные) цветности, координаты которых заводятся вручную в координатах RGB монитора. Число этих цветностей может быть любое, не превышающее 50.

г). Координаты цветности фона. Число этих цветностей также может иметь произвольное значение, а сами координаты фона вводятся в базу данных в системе RGB монитора ручным способом.

На рис. 7.10 показаны, для примера, структуры таблицы базы данных регистрации респондентов.

Программа «Обработка результатов измерения порогов цветоразличения» позволяет производить выборку всех экспериментально измеренных порогов цветоразличения по следующим параметрам:

- результатам измерения конкретного респондента;
- результатам измерений определенной группы респондентов, выделенной по возрастным и (или) половым признакам;
- условия проведения измерений порогов цветоразличения по углу восприятия (2^0 или 10^0), цветности фона (см. рис. 7.7.).

Из рис. 7.8. видно, что цвет свечения экрана монитора определяются суммой количеств основных цветов RGB экрана. Значения каждого количества отдельно «красного», «зеленого» и «синего» цветов, как уже говорилось выше, может меняться от 0 до FF (в шестнадцатеричной системе счисления) или от 0 до 255 (в обычной десятичной системе счисления), но в некоторых типах экранов мониторов существует нелинейность световой характеристики «сигнал-свет», так называемая гамма-характеристика. Для случая, если гамма не равна единице, как это имеет место в обычных цветных кинескопах, то для учета этой нелинейности в расчетах перевода из системы RGB в обычную систему

цветовых координат, например МКО 1931 г. (x, y) , применяется следующая гамма-коррекция:

$$R^* = R_1^y, \quad G^* = G_1^y, \quad B^* = B_1^y \quad (7.1)$$

где R_1 , G_1 и B_1 - приведенные к единице, значения количества RGB, т.е.

$$R_1 = \frac{R}{255}, \quad G_1 = \frac{G}{255}, \quad B_1 = \frac{B}{255}.$$

После вычислений R^* , G^* и B^* по (7.1.) необходимо обратно эти значения умножить на 255.

Далее, для перехода от системы RGB экрана монитора в систему МКО 1931 г. (x, y) можно поступить аналогично тому, как это было сделано в [10], заменив величину сигналов U_R, U_G и U_B на количества основных цветов R, G и B, и с учетом значений гаммы, получим:

$$\begin{aligned} x &= x_R \cdot R_1^{gR} + x_G \cdot G_1^{gG} + x_B \cdot B_1^{gB}, \\ y &= y_R \cdot R_1^{gR} + y_G \cdot G_1^{gG} + y_B \cdot B_1^{gB}, \\ z &= z_R \cdot R_1^{gR} + z_G \cdot G_1^{gG} + z_B \cdot B_1^{gB}, \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$m = x + y + z,$$

$$x_u = \frac{x}{m};$$

$$y_u = \frac{y}{m},$$

где $x_R, y_R, z_R, x_G, y_G, z_G$ и x_B, y_B, z_B – координаты цветности основных цветов экрана телеприемника;

x_c, y_c – координаты цветности “изображения”.

На рис. 7.11, для примера показаны результаты обработки экспериментальных измерений порогов цветоразличения в системе МКО 1931 г. (x, y).

В программе предусмотрено устанавливать следующие колориметрические системы: МКО-1931 (x, y), МКО 1960 (u, v) и разработанная автором равноконтрастная криволинейная цветовая система (α, β) [7]. Переход от системы МКО 1931 г. (x, y) к другим системам осуществляется по известным формулам:

для МКО 1960 г. (u, v)

$$u = \frac{2x}{6y - x + 1,5}, \quad v = \frac{3y}{6y - x + 1,5},$$

На рис. 7.12. для примера приведены результаты обработки экспериментальных измерений порогов цветоразличения в системе МКО 1960 г. (u, v).

Для равноконтрастной криволинейной цветовой системы [11]:

$$\alpha = a1*(\exp(f*y) + \log(k*x));$$

$$\beta = c*(\exp(s*x) - \log(d*y)).$$

где x, y, z – координаты цветности в системе МКО 1931 г,

α, β - координаты цветности в новом криволинейном цветовом пространстве, показанном на рис. 6.14.

a, f, k, c, s и d – некоторые коэффициенты.

Согласно [12] величина порога цветоразличения по Мак Адаму в системе МКО 1960 (u, v) равна 0,0038, эта величина была пересчитана для системы МКО 1931 (x, y) и для