

Феномены цветового восприятия

Ю.С. Андреев,

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии допечатных процессов

О.В. Панкин,

к.т.н., научный сотрудник центра научных исследований и сертификации

Введение

Вместе с развитием цифровых технологий большую значимость приобрела проблема достижения цветового соответствия при воспроизведении изображений на различных типах носителей информации: изображения, опубликованные полиграфическим способом в печатном издании и на экранах персональных компьютеров или карманных электронных устройств, должны восприниматься идентично. В основе данной проблемы лежат фундаментальные физические отличия при воспроизведении цвета с применением самосветящихся и несамосветящихся объектов.

В настоящее время оценка цветовых соответствий производится в размерностях классической колориметрии, основанной международной комиссией по освещению (Commission Internationale de l'Eclairage — CIE).

Система CIE чрезвычайно эффективна, однако имеет ограничения, так как построена на трехстимульных значениях, точно описывающих цветовое соответствие для усредненного наблюдателя, но не несущих никакой информации, характеризующей само цветовое ощущение.

Чтобы перейти от трехстимульных значений к перцепционным размерностям, нужна некая дополнительная информация. Одним из источников подобной информации стали исследования различных феноменов цветового восприятия, часть из которых будет описана в данной обзорной статье.

Для усредненного наблюдателя два стимула с одинаковыми трехстимульными значениями CIE XYZ будут соответствовать друг другу по цвету до тех пор, пока соблюдается ряд условий:

- определенный ретинальный локус стимуляции;
- определенный угловой размер области стимуляции;
- определенный уровень фотометрической яркости стимула.

Дополнительно, оба стимула должны иметь одинаковые окружения, фоны, размеры, формы, характеристики поверхности, геометрии освещения поверхности и т. п. Если хотя бы одно из перечисленных условий нарушено, то вполне вероятно, что цветовое соответствие исчезнет.

На практике условия, необходимые для успешного прогноза цветового соответствия на базе простой трехстимульной колориметрии, часто не могут быть соблюдены, и для этих случаев нужна расширенная, высшая колориметрия, учитывающая изменчивость перечисленных выше факторов.

Ниже будут рассмотрены различные явления, идущие в разрез с простой трехстимульной системой.

Симультанный контраст

Симультанный (одновременный) контраст или индукция — это феномен цветового восприятия, связанный с пространственной структурой стимулов.

На рис. 1, а показаны два серых патча с одинаковыми XYZ-значениями, которые соответствуют друг другу по цвету, но только до тех пор, пока рассматриваются в одинаковых условиях (на одном и том же сером фоне). Если один патч поместить на черный фон, а другой патч на белый (рис. 1, б), то они перестанут совпадать друг с другом по визуальному ощущению, но при этом их трехстимульные значения останутся неизменными.

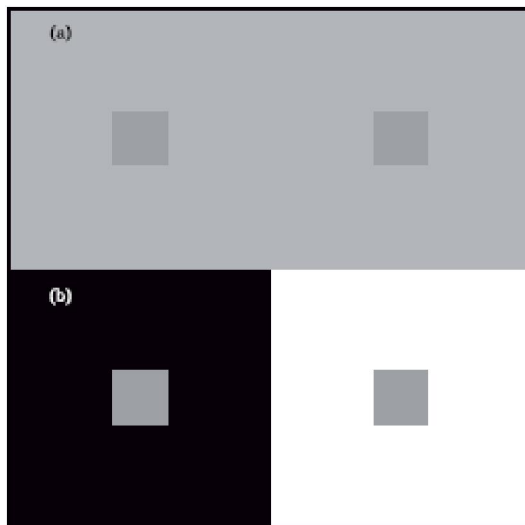


Рис. 1. Пример симультанного контраста

Симультанный контраст ведет к сдвигу цветового восприятия, когда меняется цвет фона стимулов, и этот сдвиг целиком ложится в оппонентную теорию цветового зрения. Иными словами: светлый фон индуцирует восприятие стимула как более темного, темный фон провоцирует более светлое ощущение, красный индуцирует зеленое цветовое ощущение, зеленый — красное, желтый — синее и синий индуцирует желтое цветовое ощущение. [1]

Рис. 2 иллюстрирует оппонентную теорию цветового зрения путем наблюдения постобразов. Необходимо на некоторое время зафиксировать взгляд на черной точке в месте стыковки четырех окрашенных квадратов, через 30 секунд переместить и зафиксировать взгляд на черной точке равномерного белого поля. Постобраз от красного стимула будет зеленым, от зеленого — красным, от желтого — синим и от синего — желтым.

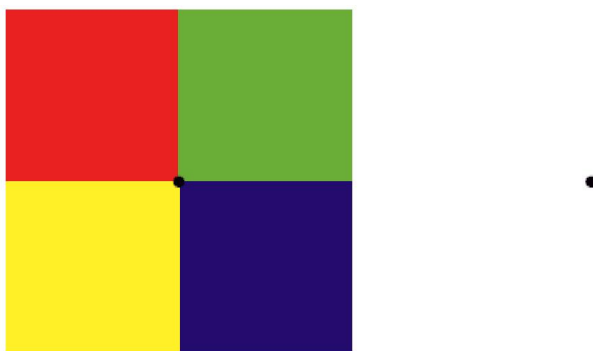


Рис. 2. Иллюстрация оппонентной теории цветового зрения

Джозеф Альберс [2] в своей работе рассматривает различные аспекты симультанного контраста. Более полное исследование можно найти в работах Гурвича [3], Бойнтонна [4] и Эванса [5]. Также этим вопросом занимались Корнелиссен и Бреннер [6]. Блэквелл и Бучсбаум [7] описывают некоторые пространственные и хроматические факторы, влияющие на степень индукции.

Робертсон [8] приводит пример хроматической индукции, выдвигающую на первый план сложную пространственную природу данного феномена. На рис. 3 можно наблюдать следующее: красные квадраты (рис. 3, а) или голубые квадраты (рис. 3, б) окружены одинаковыми цветными гранями — две желтых грани и две синих грани на каждый квадрат. Если бы хроматическая индукция зависела только от цвета граней, то все красные квадраты и все голубые квадраты воспринимались бы сходным образом. Однако из рис. 3 ясно, что квадраты, которые кажутся расположенными на желтых полосках, подвергаются индукции желтого и поэтому воспринимаются темнее и синее, а квадраты, якобы

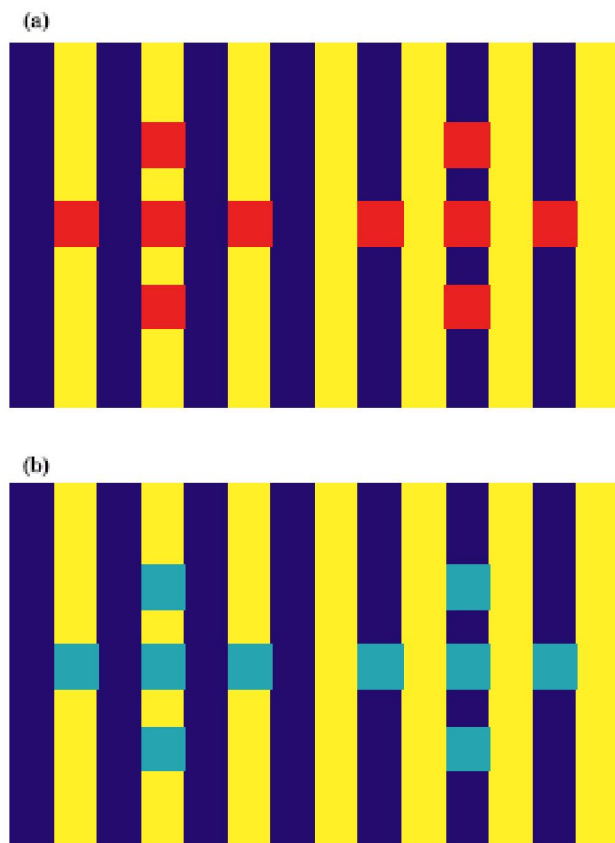


Рис. 3. Хроматическое разбеливание

расположенные на синих полосках, воспринимаются светлее и желтее. Очевидно, что симультанный контраст между стимулами больше зависит от их пространственного взаиморасположения, нежели от цвета граней. Данный эффект также имеет название хроматического разбеливания.

Оконтуривание

Феномен оконтуривания тесно связан с феноменом индукции. Оконтуривание повышает величину цветовых отличий, когда фон, на котором сравниваются стимулы, сходен по цвету с этими стимулами.

На рис. 4. показано оконтуривание пары серых образцов — отличие по светлоте между двумя серыми стимулами, расположенными на сером фоне больше, чем между серыми стимулами на белом и черном фонах. Подобные эффекты возникают и в отношении хроматических отличий.

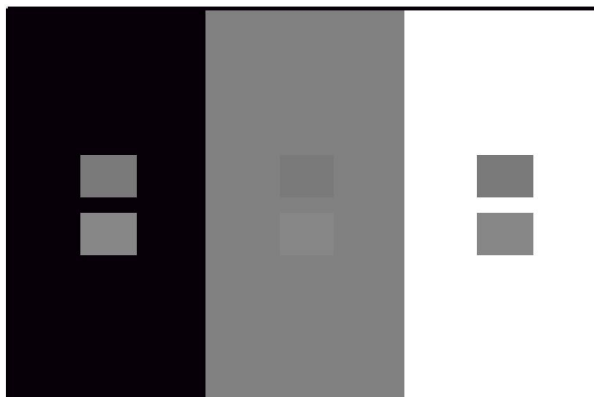


Рис. 4. Эффект окоптуривания

Феномен окоптуривания рассмотрен в труде Семмерлота [9].

Смазывание

Если растет пространственная частота стимулов или если стимулы уменьшаются в размерах, эффект симультанного контраста исчезает и заменяется эффектом смазывания. Смазывание — это результат смешения исследуемого цветового стимула со стимулом окружения. Данный эффект возникает при том уровне пространственной частоты, когда стимулы более не воспринимаются как дискретные, а воспринимаются как единый стимул. На подобном принципе построено автотипное растривание. Однако смазывание возникает на меньших пространственных частотах, чем те, на которых происходит слияние, и хотя стимулы все еще остаются отличными от фона, их цвета начинают смешиваться.

Рис. 5 демонстрирует симультанный контраст и смазывание по одному и тому же цветовому тону.



Рис. 5. Симультанный контраст и смазывание

Колориметрически ахроматичные патчи с разной пространственной частотой расположены на красном фоне: на низкочастотных патчах имеет место симультанный контраст, и патчи воспринимаются слегка зеленоватыми; однако на высоких пространственных частотах возникает смазывание, и патчи воспринимаются розоватыми.

Важность эффектов смазывания и симультанного контраста рассмотрены в лекциях Чевреула [10].

Эффект Бецольда — Брюкке

Данный эффект выражается в сдвиге цветового тона при изменении фотометрической яркости монохроматического стимула.

Экспериментальные результаты по изучению эффекта Бецольда — Брюкке опубликованы Парди [11]. Некоторые из них показаны на рис. 6.

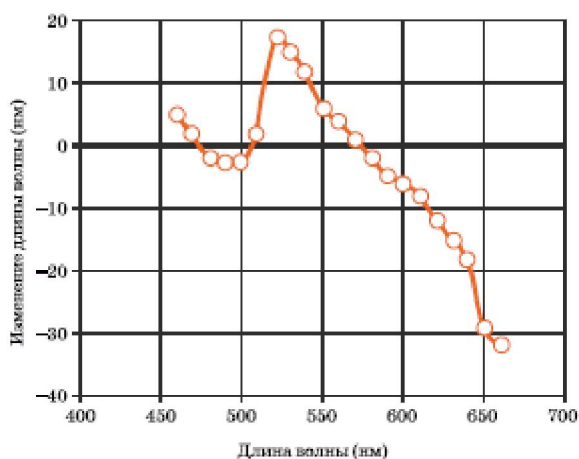


Рис. 6. Сдвиг длины волны, требуемый для обеспечения постоянства цветового тона при десятикратном уменьшении светимости стимула

Данные указывают на изменение в длине волны, необходимое для сохранения постоянства восприятия цветового тона при десятикратном падении яркости стимула. Например, для получения соответствия по цветовому тону при данной яркости на длине волны в 650 нм, при десятикратно меньшей яркости потребуются стимул с длиной волны 620 нм (сдвиг: -30 нм).

В классической колориметрии CIE монохроматический свет независимо от уровня фотометрической яркости стимула всегда имеет одни и те же трехстимульные значения. Таким образом, трехстимульные значения указывают на то, что цвет монохроматического излучения якобы одинаков на всех уровнях яркости. Данные Парди опровергают этот тезис и говорят о необходимости учета абсолютного уровня яркости стимула в прогнозировании цветового восприятия.

Эффект Эбнея

Согласно классической колориметрии, если белый свет смешивать в разных пропорциях с монохроматическим светом определенной длины волны, то смесь будет менять свою колориметрическую чистоту, сохраняя при этом постоянство доминирующей длины волны. Набор таких смесей будет лежать на прямой линии между белой точкой и позицией монохроматического стимула на локусе диаграммы цветностей; при этом цветовой тон набора смесей будет оставаться постоянным.

Однако как показывают экспериментальные данные, смеси монохроматического излучения с белым светом не держат цветовой тон, что известно как эффект Эбнея.

Эффект Эбнея можно проиллюстрировать путем вычерчивания линий постоянного цветового тона для смесей монохроматических стимулов с белыми стимулами. Результаты Робертсона [12], также изучавшего данный феномен, показаны на рис. 7.

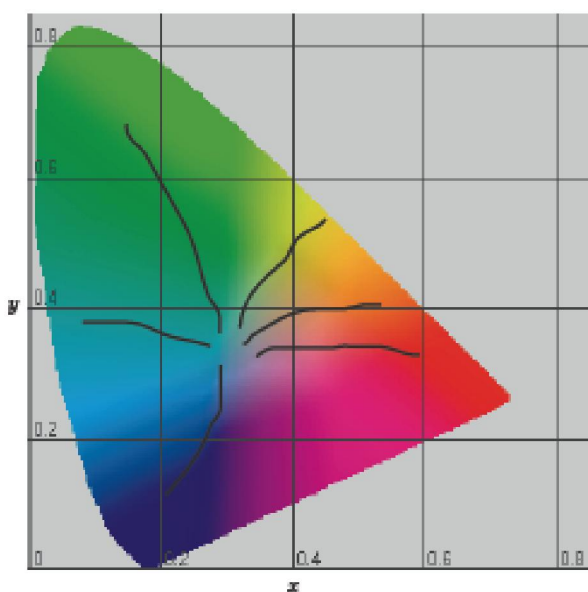


Рис. 7. Контуры постоянного цветового тона на диаграмме цветностей CIE 1931, иллюстрирующие эффект Эбнея

Шесть линий с постоянным цветовым тоном получены на основе психофизических экспериментов, проведенных с тремя наблюдателями.

То есть эффект Эбнея проявляется тем, что прямые линии, радиально расходящиеся из белой точки диаграммы цветностей, не являются линиями постоянного цветового тона.

Эффект Ханта

Эффект Ханта выражается в том, что ощущение полноты цвета хроматического стимула растет по мере роста его фотометрической яркости.

Эффект Ханта был выявлен в процессе исследования феноменов световой и темновой адаптации цветового зрения (Хант [13]). Хант обобщил данные по согласованным цветовым стимулам, полученные через так называемое гаглоскопическое соответствие: левый и правый глаза наблюдателя были адаптированы к разным просмотровым условиям, и соответствия были получены между стимулами, по отдельности предъявляемыми левому и правому глазам.

В соответствии с полученными результатами стимулу с низкой колориметрической чистотой при высокой яркости ($10\,000\text{ кд/м}^2$) будет соответствовать стимул низкой яркости (1 кд/м^2), но с высокой колориметрической чистотой.

Таким образом было достоверно установлено, что при повышении яркости хроматического стимула усиливается ощущение полноты его цвета.

Эффект Ханта может быть проиллюстрирован рис. 8.

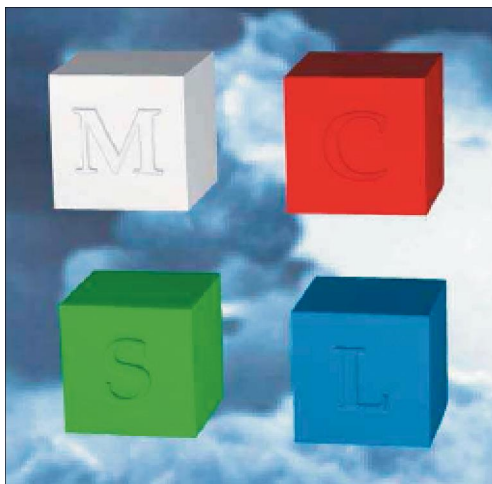


Рис. 8. Иллюстрация роста полноты цвета по мере роста фотометрической яркости

Более освещенные стороны кубиков воспринимаются более полноцветными.

Эффект Стивенса

Эффект Стивенса — это рост субъективно-яркостного (или светлотного) контраста по мере роста яркости стимулов.

Подобно хантовскому эффекту, эффект Стивенса был обнаружен в результате классических психофизических экспериментов (Стивенс и Стивенс, [14]), при которых наблюдателей просили установить величину субъективной яркости стимулов в различных условиях адаптации. Результаты экспериментов продемонстрировали степенную зависимость между субъективной яркостью и измеренной яркостью стимулов (данную зависимость в психофизике часто именуют степенным законом Стивенса). График данной зависимости будет степенным в линейных координатах, но превращается в прямую линию в координатах логарифмических (наклон прямой равен степени функции).

Набор типичных графиков с логарифмическими осями, полученный в экспериментах Стивенса и Стивенса [14], показан на рис. 9.

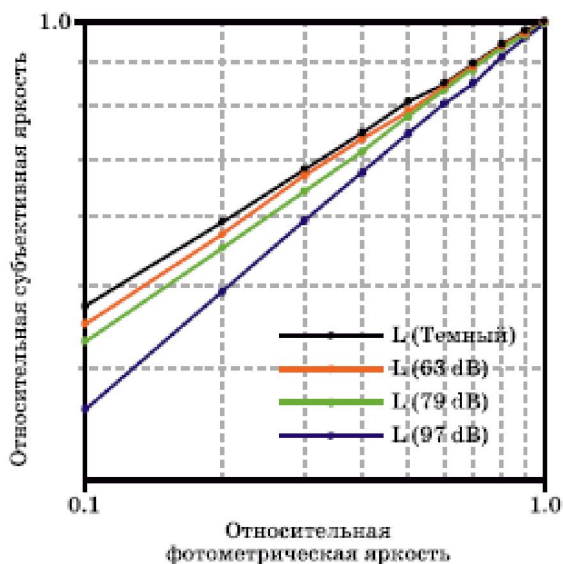


Рис. 9. Изменения в светлотном контрасте, как функция от адаптирующей яркости, согласно эффекту Стивенса

Линии демонстрируют усредненные относительные величины субъективной яркости как функцию от относительной яркости стимула (при четырех различных уровнях адаптации наблюдателя). По графикам видно, что наклон прямых (соответственно и степень функции) растет по мере роста адаптирующей яркости стимула.

Эффект Стивенса выражается в том, что по мере роста фотометрической яркости сложных стимулов темные стимулы воспринимаются еще более темными, а светлые — еще более светлыми.

Эффект Стивенса можно наблюдать при показе одного и того же изображения при низком и высоком уровнях фотометрической яркости. Особенно наглядным явится черно-белое изображение: при низ-

ком уровне яркости оно будет выглядеть весьма низкоконтрастным — «белые» области не будут восприниматься очень яркими а темные области не будут казаться очень темными (что странно); если затем это же изображение вынести на яркий свет, то «белые» области будут восприниматься существенно более яркими, а темные — существенно более темными, — то есть визуальный контраст изображения вырастет.

Эффект Бартлесона — Бренемана

Экспериментальные данные, полученные Бартлесоном и Бренеманом через установку соответствий и последующее шкалирование результатов, показали, что визуальный контраст изображений растет по мере перехода окружения от темного, через среднее, к светлому. Данный эффект возникает потому, что темное окружение заставляет темные области изображения казаться светлее, в то время как влияние окружения на светлые области незначительно (белые участки остаются белыми несмотря на изменения в окружении). Таким образом, поскольку в темных областях изображения визуальные изменения больше, нежели в светлых, на выходе имеем изменения в визуальном контрасте.

В 1967 году Бартлесон и Бренеман [15] опубликовали уравнения, весьма удачно прогнозирующие экспериментальные результаты; а в статье, посвященной оптимизации тоновых репродукций, Бартлесон [16] дал набор простых уравнений, имевших большое практическое значение.

На рис. 10 показаны предикторы светлоты (как функции от относительной яркости в различных условиях окружения), согласующиеся с результатами Бартлесона и Бренемана. Данный график математически идентичен данным Стивенсов (рис. 9): прямые линии с разными углами наклона к логарифмическим осям можно пересчитать в степенные функции по линейным осям и получить кривые, сходные с кривыми Бартлесона и Бренемана (рис. 10).

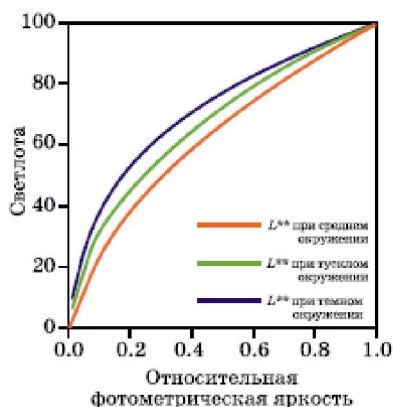


Рис. 10. Изменения в светлотном контрасте как функция от относительной фотометрической яркости окружения

Очень часто пользователи графических компьютеров выключают в помещении свет, дабы дисплей воспринимался более контрастным. В результате окружение становится темным, что, согласно Бартлесону и Бренеману, должно, напротив, привести к падению контраста изображений на экране, но можно наблюдать, что прогнозы ученых противоречат повседневному опыту. Однако же причина происходящего в том, что источники освещения в рабочей комнате обычно дают паразитные рефлексии на экран дисплея, понижающие физический контраст изображения, и если окружение дисплея удастся осветить без паразитных отражений на поверхность монитора (к примеру, за счет расположения источников света позади монитора), то визуальный контраст изображения на экране оказывается большим, нежели в темном помещении.

Когнитивное обесцвечивание осветителя

Механизмы хроматической адаптации можно разделить на сенсорные и когнитивные. Хантом и Винтером [17], а также Фейрчайлдом [18, 19, 20, 21] четко установлено, что сенсорные механизмы не в состоянии обеспечить хроматическую адаптацию в полном объеме, однако в типичных условиях просмотра, наблюдатели воспринимают окрашенные объекты так, как будто адаптация по осветителю того или иного цвета прошла полностью (к примеру, белый объект воспринимается белым при свете лампы накаливания, флуоресцентном свете или дневном). Поскольку, как было сказано выше, сенсорные механизмы не способны обеспечить такое восприятие, говорят, что процесс хроматической адаптации завершают так называемые когнитивные механизмы, основанные на знании объектов, освещении и условиях просмотра в целом.

«Обесцвечивание осветителя» относится к когнитивной интерпретации наблюдателями цветовых стимулов, определяемой особенностями освещения, что в конечном итоге позволяет воспринимать цветовые стимулы объектов независимо от изменений в освещении.

Учет эффекта когнитивного обесцвечивания осветителя полезен в работе с изображениями, к примеру, при сравнении изображений, выполненных на разных носителях: при рассматривании отпечатков наблюдатели способны подстраиваться под цвет осветителя, однако же, когда они смотрят на экран монитора, в их поле зрения нет освещенных объектов, и эффекта когнитивного обесцвечивания осветителя не возникает. Таким образом, в некоторых ситуациях бывает необходимо смоделировать изменения в режиме просмотра.

Некоторые структурные эффекты

Рис. 11 демонстрирует возникновение структурной иллюзии, которая имеет мало общего с цветом, но подчеркивает важность окру-

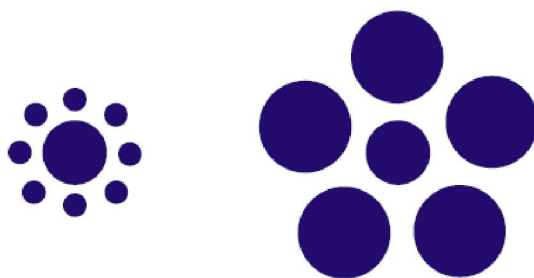


Рис. 11. Пример пространственного симультанного контраста

жения стимула: оба центральных круга имеют одинаковый диаметр, однако тот, что окружен большими кругами, воспринимается как круг с меньшим диаметром. Данный эффект не относится к цветовой проблематике непосредственно, но, тем не менее, он демонстрирует влияние на восприятие пространственных вариаций стимулов, а также несомненную функциональную связь между восприятием пространственным и восприятием цветовым.

Различные эффекты прозрачности помогают убедиться в наличии взаимосвязи между пространственным и хроматическим восприятиями. Один из примеров предлагает Адельсон [22]: на рис. 12, а показаны два ряда одинаковых серых ромбов; на рис. 12, б к ромбам сделана небольшая добавка из разнотонных уголков: видно, что уголки не оказывают никакого (или почти никакого) влияния на восприятие ромбов; на рис. 12, с те же ромбы частично расположены на различных фонах, но поскольку каждый ромб слегка «наползает» на соседний фон, то разница в восприятии рядов по-прежнему минимальна; однако на рис. 12, d, где ромбы с разнотонными уголками расположены на разнотонных фонах, — налицо явное перцепционное отличие одного ряда ромбов от другого, которое когнитивно интерпретируется как эффект прозрачности (называемый также теневым эффектом).

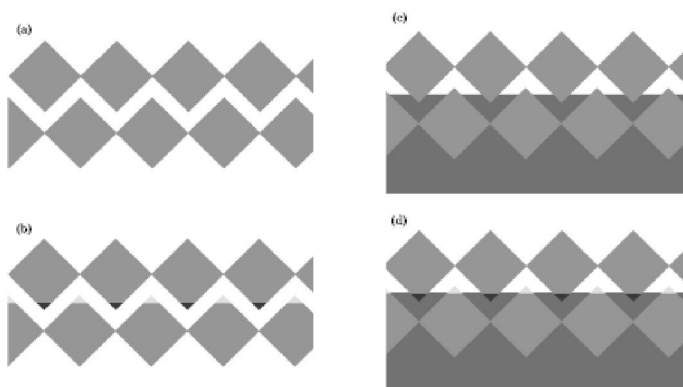


Рис. 12. Эффект визуального контраста, зависящий от когнитивной интерпретации пространственной структуры стимулов

Такую же демонстрацию можно устроить и в цвете с использованием, к примеру, желтого и синего фонов и уголков. Тогда можно убедиться в том, что на общее восприятие влияет не только пространственное расположение стимулов, но и их когнитивная интерпретация.

Заключение

Выше был рассмотрен ряд феноменов цветового восприятия, иллюстрирующих тот факт, что классическая базовая колориметрия не позволяет достоверно рассчитать результирующий цвет процесса цветовоспроизведения.

Тем временем, современная полиграфическая отрасль предъявляет все большие требования к указанному процессу. Здесь накладывается несколько факторов. Это и необходимость точно предсказать результирующий цвет в абсолютно разных целевых условиях, и постоянно растущая вариативность стадий процесса цветовоспроизведения. В погоне за повышением оперативности и понижением себестоимости продукции, полиграфические производства стремятся избежать как можно больше промежуточных стадий работы с цветом. Одним из решений, позволяющим осуществить данный замысел, является механизм цветопробной видеовоспроизводящей системы. Но процесс стабильного и достоверного предсказания цвета, с использованием изображения на экране монитора практически невозможен, если применять классическую трехстимульную колориметрию CIE, что вызвано рядом физических и психофизических факторов, часть из которых описана в данной статье. Соответственно, для решения указанных проблем нужно понимание этих причин и природы этих факторов, что в конечном итоге позволит построить модели цветового восприятия.

Библиографический список

1. *Fairchild M.D.* Color Appearance Models, 2nd Edition. — Reading, Harlow, Menlo Park, Berkley, Don Mills, Sydney, Bonn, Amsterdam, Tokyo, Mexico City: Wiley, 2004. — 408 p.: il.
2. *Albers J.* Interaction of Color. — New Haven: Yale University Press, 1963.
3. *Hurvich L.M.* Color Vision. — Sunderland: Sinauer Associates, Mass., 1981.
4. *Boynton R.M.* Human Color Vision. — Washington: Optical Society of America, 1979.
5. *Evans R.M.* An Introduction to Color — New York: John Wiley & Sons, 1948.
6. *Cornelissen F.W., Brenner E.* // On the role and nature of adaptation in chromatic induction, Channels in the Visual Nervous System: Neurophysiology, Psychophysics and Models — London: B. Blum, Ed., Freund Publishing, 1991. — P. 109–123.

7. *Blackwell K.T.* and *Buchsbaum G.* // The effect of spatial and chromatic parameters on chromatic induction, *Color Res. Appl.* 13, 1988. — P. 166–173.
8. *Robertson A.R.* Figure 6–2 Presented at the 1996 ISCC Annual Meeting — Orlando, Fla, 1996.
9. *Semmelroth C.C.* // Prediction of lightness and brightness on different backgrounds, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 1970. — P. 1685–1689.
10. *Chevreul M.E.* The Principles of Harmony and Contrast of Colors, 1839. (Reprinted, Van Nostrand Reinhold — New York, 1967).
11. *Purdy D.M.* // Spectral hue as a function of intensity. *Am. J. Psych.* 43, 1931. — P. 541–559.
12. *Robertson A.R.* // A new determination of lines of constant hue. — Stockholm, *AIC Color*, 69, 1970. — P. 395–402.
13. *Hunt R.W.G.* // Light and dark adaptation and the perception of color. *J. Opt. Soc. Am.*, 42, 1952. — P. 190–199.
14. *Stevens J.C., Stevens S.S.* // Brightness functions: Effects of adaptation. *J. Opt. Soc. Am.*, 53, 1963. — P. 375–385.
15. *Bartleson C.J., Breneman E.J.* // Brightness perception in complex fields. *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 1967. — P. 953–957.
16. *Bartleson C.J.* // Optimum image tone reproduction. *J.SMPTE*84, 1975. — P. 613–618.
17. *Hunt R.W.G., Winter L.M.* // Colour adaptation in picture viewing situations. *J. Phot. Sci.* 23, 1975. — P. 112–115.
18. *Fairchild M.D.* // Chromatic adaptation and color constancy. *Advances in Color Vision Technical Digest*, Vol. 4 of the OSA Technical Digest Series. — Washington, D.C.: Optical Society of America, 1992. — P. 112–114.
19. *Fairchild M.D.* // Chromatic adaptation to image displays. *TAGA* 2, 1992. — P. 803–824.
20. *Fairchild M.D., Lennie P.* // Chromatic adaptation to natural and artificial illuminants. *Vision Res.* 32, 1992. — P. 2077–2085.
21. *Fairchild M.D.* // Chromatic adaptation in hard copy/soft copy comparisons. *Color Hard Copy and Graphic Arts II*, *Proc. SPIE* 1912, 1993. — P. 47–61.
22. *Adelson E.H.* // Perceptual organization and the perception of brightness. *Science* 2, 1993. — P. 2042–2044.