**Антон Шаракшанэ** | anton@colorindex.ru

# Шкалы оценки качества спектрального состава света — CRI и CQS

## Цвет, который не освещен, не существует

Цвет поверхности определяется в первую очередь ее отражательными свойствами и спектральным составом освещения. Чтобы считать какой-то цвет «истинным», нужно оговорить эталонный источник освещения. В большинстве случаев в качестве такого эталонного источника разумно использовать фазу дневного света.

Освещение со спектром, отличным от эталонного, не обязательно, но может привести к изменению воспринимаемых цветов. Для набора тестовых цветовых образцов эти изменения можно наблюдать своими глазами, а можно рассчитать разницу координат цвета в каком-либо из цветовых пространств — так называемые цветовые сдвиги. Специалисту по цвету, безусловно, интересны и величина, и характер этих сдвигов. Но большую часть потребителей такой объем информации лишь запутает. Необходима процедура, сужающая богатство и многомерность категории качества, к которой относятся особенности спектрального состава, до одного значения.

С 1965 г. качество света искусственных источников сравнивается по рекомендованной Международной комиссией по освещению (МКО) методике расчета CRI (Color Rendering Index), последнее значимое исправление в которую внесено в 1974 г. Основное назначение методики — рассчитывать одно значение, характеризующее величину цветовых сдвигов для набора цветовых образцов под исследуемым светом по сравнению с солнечным в соответствующей фазе или излучением абсолютно черного тела той же цветовой температуры.

Основными источниками света, качество которых призвана оценивать методика CRI, являлись люминесцентные лампы с трех- или пятилинейчатым спектром. Но для осветительных светодиодов, «белый» свет которых в самом худшем случае может состоять только из двух цветов — глубокого синего и желтого, шкала уже не в полной мере удовлетворяет своему назначению. Кроме того, с 1974 г. МКО несколько раз уточняла методики расчета цветовых сдвигов.

Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) разработал и в 2010 г. опубликовал свою модификацию старой методики оценки качества света, в которой попытался разом исправить все ее известные недостатки. Новая методика названа Color Quality Scale (CQS) и претендует на отраслевой стандарт. Для специального применения разработаны дополнительные шкалы — Color Fidelity Scale и Color Preference Scale. Примет ли МКО эти методики в качестве нового стандарта, внесет ли поправки, оставит ли старое название или примет новое, неизвестно. Но на сегодня CQS заслуживает внимания как самая совершенная шкала оценки качества спектрального состава света.

### Эталонный источник

За эталонный источник, с которым производится сравнение, в обеих методиках — CRI и CQS — берется фаза дневного света с той же цветовой температурой, что и коррелированная цветовая температура испытываемого источника, если она превышает 5000 К, или излучение абсолютно черного цвета с той же температурой, если она меньше 5000 К. Таким образом, дневной свет и излучение достаточно горячих абсолютно черных тел (при температуре более 3500 К) имеют высшие значения индексов CRI и CQS по определению.

### Цветовые образцы

Для расчета частных индексов цветопередачи *Ri* рассчитываются цветовые сдвиги для четырнадцати цветовых образцов (рис. 1). Затем считается среднее арифметическое первых восьми индексов. Первые восемь образцов — ненасыщенные цвета, которые довольно трудно исказить, освещая источниками со специфическим спектром. Поэтому среднее арифметическое первых восьми частных индексов цветопередачи обычно имеет довольно лестное высокое значение и охотно используется. Это значение МКО рекомендовала называть General Color Rendering Index, или *Ra*. В технической документации зачастую это значение называется просто CRI.

Цветовые образцы с девятого по четырнадцатый — это насыщенные цвета, добавленные в общий набор МКО в 1974 г. Они сильнее подвержены искажениям при изменении источника света, поэтому соответствующие частные индексы цветопередачи оказываются существенно меньше, чем у первых восьми. Особенно низким при оценке качества белого светодиодного света получается значение R9, характеризующее цветопередачу насыщенного красного. Это и не удивительно, ведь в спектре типичного белого светодиода красной компоненты очень мало.

Тринадцатый цветовой образец, утвержденный МКО, представляет особенный интерес — это усредненный цвет лица европеоида. Довольно часто в литературе встречается и уже почти стал стандартным дополнительный пятнадцатый индекс цветопередачи — для образца, соответствующего цвету лица азиата.

Эта методика — достаточно мощный и гибкий инструмент. Любой человек самостоятельно может добавить к методике сколько угодно цветовых образцов и рассчитать собственные частные индексы цветопередачи.

Основным недостатком методики CRI называют использование ненасыщенных цветов

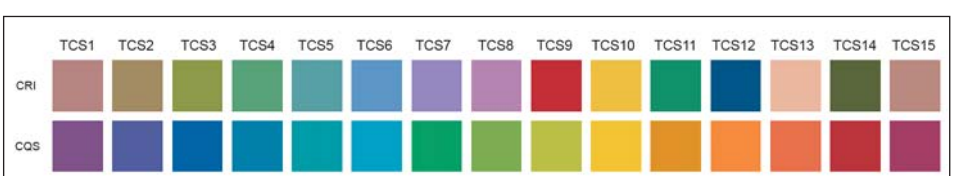


**Рис. 1.** Цветовые образцы для расчета индексов Ri и Qi. Цвета для иллюстрации рассчитаны при освещении фазой солнечного света с цветовой температурой 5000 К

и усреднение частных индексов. Сильные цветовые сдвиги на отдельных образцах незначительно повлияют на среднее значение, и общий индекс цветопередачи может оказаться высоким.

Методика CQS предполагает использование пятнадцати образцов только насыщенных цветов, сильно подверженных цветовым сдвигам. Для получения общего индекса рассчитывается корень из суммы квадратов цветовых сдвигов по каждому образцу. Это сделано для того, чтобы сильный цветовой сдвиг даже по одному образцу не позволил бы оставаться высоким общему индексу.

Однако образец насыщенного красного CQS TCS 14 является несколько менее насыщенным цветом по сравнению с образцом насыщенного красного CRI TCS 9 и поэтому подвержен меньшим изменениям. Возможно, образец выбран таким, чтобы не пугать потребителей светодиодного освещения традиционной плохой цветопередачей красного и одновременно стимулировать производителей указывать в проспектах индексы CQS вместо индексов CRI.

## Цветовое пространство

Цветовой сдвиг — это разность координат цвета при освещении эталонным и испытываемым источниками света в каком-либо цветовом пространстве. Чтобы величина цветовых сдвигов однозначно соответствовала степени визуально воспринимаемого изменения цвета, цветовое пространство должно быть однородным.

Пространства CIEXYZ для двух- и десятиградусного наблюдателей появились в результате опытов по цветосмешению и до сегодняшнего дня являются единственными удобными пространствами для иллюстрации результатов цветосмешения, потому они чаще других используются в литературе. Но эти пространства не являются однородными.

Методика CRI использует цветовое пространство CIEUVW 1964, которое является однородным по сравнению с пространствами CIEXYZ. Однако новые экспериментальные данные позволили МКО в 1976 г. рекомендовать для расчета цветовых сдвигов пространство CIELAB, которое является наиболее однородным общепризнанным цветовым пространством и по сегодняшний день. В методике CQS цветовые сдвиги рассчитываются в пространстве CIELAB (рис. 2).

## Адаптация

Формы кривых спектральной чувствительности цветных рецепторов определяются спектрами поглощения зрительных пигментов и неизменны. Но механизм цветовосприятия человека устроен так, как если бы относительная чувствительность цветных каналов при адаптации к новой наблюдаемой сцене изменялась. Подстройка чувствительности происходит таким образом, чтобы наиболее светлая часть поля зрения казалась белой. Из-за адаптации сильнейшие изменения спектрального состава могут привести, а могут и не привести к значительным изменениям воспринимаемого цвета. Например, благодаря адаптации кожа человеческого лица кажется естественного узнаваемого цвета и под солнечным светом с цветовой температурой 6500 K, и под светом лампы накаливания с цветовой температурой 2800 K. Но под светом компактной люминесцентной лампы неизвестного происхождения та же кожа может приобрести замысловатый нездоровый оттенок.

В методике CRI используется процедура пересчета цветовых координат для учета цветовой адаптации с наиболее точной на момент введения методики матрицей коэффициентов преобразования. С тех пор эта матрица уточнялась разными исследователями несколько раз. Методика CQS использует одну из современных методик преобразования цвета для учета цветовой адаптации — CMCCAT2000.

## Диапазоны шкал

Спектр люминесцентных ламп, хоть и является линейчатым, относительно равномерно заполняет наибоее важную центральную область видимого диапазона. Это обстоятельство, а также использование ненасыщенных цветовых образцов приводило к тому, что значения индексов *Ri* в большинстве случаев оставались положительными и позволяли пользователям предполагать, что вся шкала CRI имеет диапазон от 0 до 100. Однако для насыщенных цветов и для спектров с иным распределением световой энергии изменения цвета могут быть настолько большими, что приведут к отрицательным индексам цветопередачи. Это обескураживает.

Методика расчета CQS содержит преобразование, практически не изменяющее частные индексы со значением более 30, но увеличивающее более низкие значения таким образом, чтобы они не стали отрицательными. Поэтому диапазон значений коэффициента *Qi* находится в интуитивно понятных пределах от 0 до 100.

## Случаи низкого значения цветовой температуры

CRI может принимать высокое значение даже для источников с экстремально низкой цветовой температурой, например для пламени свечи. Но по опыту мы знаем, что возможность зрения к цветоразличению при столь низких цветовых температурах уменьшается.

Методика CQS, в отличие от CRI, штрафует снижение цветовой температуры ниже 3500 K. Это производится домножением частных индексов цветопередачи на коэффициент, равный единице при цветовой температуре более 3500 K и прогрессивно уменьшающийся до нуля при снижении цветовой температуры примерно до 850 K. В результате этой поправки общие индексы качества света ламп накаливания по новой шкале уже не будут иметь столь высоких значений, практически недостижимых для светодиодных источников.

## Изменение насыщенности цвета

Цветовой сдвиг может заключаться в изменении светлоты, цветового тона и насыщенности цвета. Любые изменения приводят к снижению индексов CRI. Но индексы CQS при увеличении насыщенности цветов не снижаются.

Возможно, введение этого новшества и есть основное отличие между двумя шкалами. И, возможно, именно оно послужит главным мотивом перехода отрасли на новую методику. Светодиодные технологии в перспективе позволят «собирать» цвет, воспринимаемый зрением как белый, из цветных светодиодов, управляемо и резко увеличивая насыщенность некоторых цветов. Ягоды клубники на прилавке супермаркета, освещенного таким источником, будут казаться краснее, а листья зеленее. Это может быть полезным.

## Дополнительные шкалы для специалистов

Коллектив, разработавший Color Quality Scale (*Qa*), предлагает две модификации этого

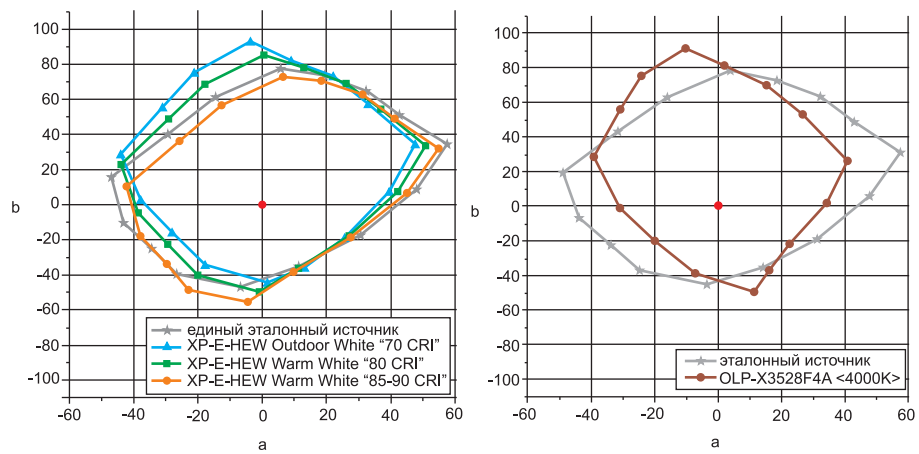


**Рис. 2.** На плоскости значений координат ab однородного цветового пространства Lab удобно демонстрировать изменение насыщенности цветов (удаление координат цвета от точки 0,0) и изменение цветового тона (поворот относительно точки 0,0 по часовой или против часовой стрелки) под различными источниками

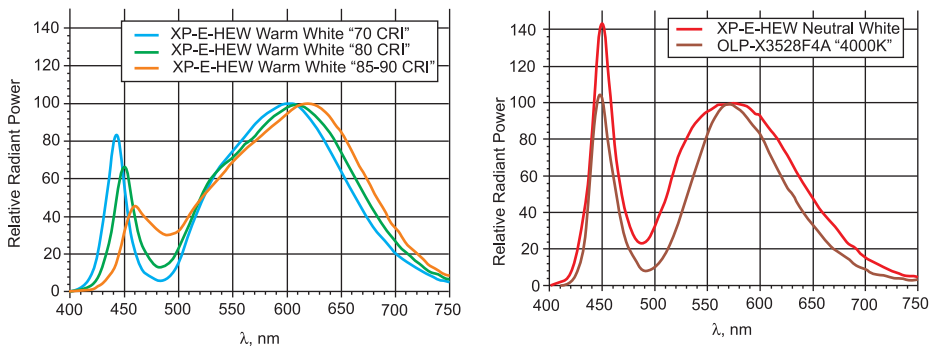


**Рис. 3.** Спектры выбранных для иллюстрации источников света. Заполнение провала в сине-зеленой области (слева) и расширение длинноволнового пика (справа) приводит к уменьшению цветовых сдвигов и увеличению индексов оценки качества спектрального состава, но снижает спектральную световую эффективность

**Таблица.** Расчет индексов

| | XP-E-HEW Outdoor White «70 CRI» | XP-E-HEW Warm White «80 CRI» | XP-E-HEW Warm White «85-90 CRI» | XP-E-HEW Neutral White | OLP-X3528F4A «4000K» |
|---|---|---|---|---|---|
| LER, лм/Вт | 323 | 310 | 294 | 324 | 355 |
| Qa | 68 | 79 | 83 | 74 | 56 |
| Qf | 61 | 76 | 81 | 71 | 53 |
| Qp | 75 | 83 | 84 | 76 | 60 |
| Q1 | 79 | 84 | 87 | 82 | 71 |
| Q2 | 93 | 96 | 94 | 96 | 95 |
| Q3 | 69 | 76 | 85 | 67 | 54 |
| Q4 | 64 | 76 | 74 | 63 | 44 |
| Q5 | 62 | 78 | 72 | 72 | 55 |
| Q6 | 55 | 75 | 74 | 75 | 56 |
| Q7 | 58 | 73 | 81 | 78 | 59 |
| Q8 | 78 | 84 | 86 | 87 | 76 |
| Q9 | 89 | 93 | 86 | 89 | 85 |
| Q10 | 67 | 80 | 86 | 73 | 58 |
| Q11 | 63 | 77 | 89 | 68 | 45 |
| Q12 | 61 | 77 | 89 | 69 | 43 |
| Q13 | 65 | 79 | 89 | 72 | 48 |
| Q14 | 66 | 76 | 83 | 66 | 45 |
| Q15 | 71 | 79 | 85 | 72 | 55 |
| Ra | 75 | 83 | 90 | 76 | 61 |
| R1 | 74 | 82 | 89 | 75 | 56 |
| R2 | 81 | 87 | 95 | 82 | 73 |
| R3 | 84 | 90 | 98 | 84 | 82 |
| R4 | 74 | 82 | 86 | 75 | 53 |
| R5 | 72 | 80 | 88 | 74 | 54 |
| R6 | 71 | 81 | 93 | 72 | 56 |
| R7 | 81 | 87 | 91 | 85 | 76 |
| R8 | 60 | 70 | 78 | 65 | 40 |
| R9 | 2 | 28 | 51 | −1 | −60 |
| R10 | 53 | 68 | 86 | 53 | 32 |
| R11 | 69 | 79 | 85 | 70 | 38 |
| R12 | 46 | 59 | 73 | 44 | 22 |
| R13 | 75 | 83 | 90 | 76 | 59 |
| R14 | 90 | 93 | 99 | 90 | 89 |
| R15 | 71 | 79 | 85 | 72 | 54 |

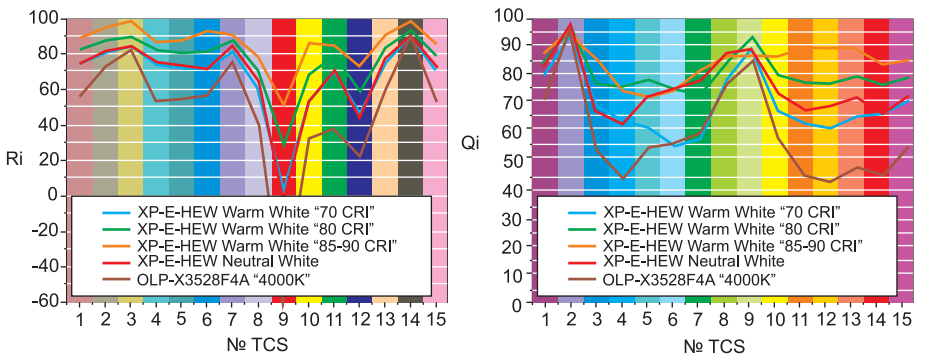


**Рис. 4.** Индексы:Ri и Qi

индекса — Color Fidelity Scale (*Qf*) и Color Preference Scale (*Qp*). Оба они рассчитываются аналогично *Qa*. Но *Qf* штрафует любое изменение цвета, в том числе увеличение насыщенности, снижая значение индекса. А *Qp* штрафует изменение тона и уменьшение насыщенности, но поощряет увеличение насыщенности цветов.

Очевидное применение индекса *Qf* — сравнение источников света при выборе освещения студий художников, магазинов тканей, малярных мастерских и т. д. Очевидное применение индекса *Qp* — сравнение источников света для освещения витрин магазинов.

## Примеры и некоторые наблюдения

В иллюстративных целях для анализа выбраны спектры семейства светодиодов тепло-белого оттенка свечения Cree XP-E-HEW с различными заявленными типичными индексами цветопередачи — 70, 80 и 85–90. Также для сравнения взяты спектры светодиодов с близкими цветовыми температурами, но с различной шириной желтого пика — это Cree XP-E Neutral White и OLP-X3528F4A «4000K» производства ГК «Оптоган». Графики спектров взяты из технической документации на изделия и оцифрованы с шагом в 5 нм с максимальной добросовестностью, но с некоторой неизбежной погрешностью. Поэтому результаты расчетов носят лишь иллюстративный характер. Все спектры для удобства визуального сравнения нормированы так, чтобы максимум длинноволнового пика составлял 100 единиц (рис. 3).

Для выбранных спектров рассчитаны индексы *Qa*, *Qf*, *Qp*, *Qi*, *Ra*, *Ri*. Для справки также приведен Luminaire Efficacy Rating (LER) (таблица).

Значения индексов *Qi* в целом оказываются более лестными, чем *Ri* (рис. 4). Видно, что при-

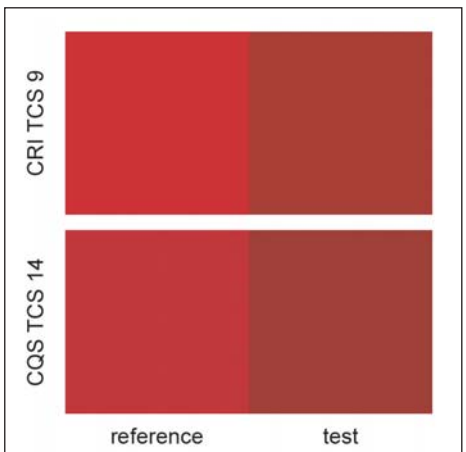


**Рис. 5.** Изменения цвета образца CRI TCS9 (вверху) и CQS TCS14 (внизу) при освещении эталонным источником (слева) и светом диода OLP-X3528F4A «4000K» (справа). CRI TCS9 является более насыщенным красным цветом по сравнению с CQS TCS14 и потому подвержен большим изменениям

**Рис. 6.** Изменения цвета пятнадцати образцов из набора CQS при освещении эталонным источником (вверху) и светом диода OLP-X3528F4A «4000K» (внизу)

чиной низких значений R9 и Q14 является узость желтого пика белого светодиода, в котором практически отсутствует красный свет. Расширение спектра и добавление красной компоненты улучшает ситуацию с R9 и Q14. Уменьшение провала в сине-зеленой области на примере семейства теплых белых XP-E-HEW улучшает значение других индексов (рис. 3, 4).

Значение LER — это спектральная световая эффективность, равная световому потоку (лм), приходящемуся на единицу энергетического потока (Вт). Оно соответствует предельной теоретической световой эффективности светодиода при данном спектре. Сравнив значения в таблице, можно увидеть, что LER косвенно служит оценкой качества света. Более высокие значения индексов цветопередачи не очень сильно, но закономерно соответствуют более низким значениям LER. Белый свет, состоящий только из двух цветов (глубокий синий и желтый), имеет больший LER, чем вариант с более широким длинноволновым пиком с добавлением красной и зеленой компоненты. Заполнение провала в голубой области также увеличивает индексы качества света, но уменьшает LER.

На рис. 6 показаны изменения цвета всех тестовых образцов из набора CQS. Рис. 5 иллюстрирует изменение цвета образцов насыщенного красного под освещением эталонным источником и светодиодом OLP-X3528F4A «4000K». Для примера рассчитаны изменения насыщенного красного — девятого образца из комплекта образцов CRI (верхняя пара) и четырнадцатого из комплекта образцов CQS (нижняя пара). Эти образцы, как правило, подвержены наиболее сильным цветовым сдвигам под светодиодным освещением. Зрительно воспринимаемая разница цветов не так велика, как можно предположить, посмотрев на значения индексов. Цветовые сдвиги для остальных образцов еще меньше. Это означает, что умеренно низкие значения индексов качества не являются значительной проблемой для нетребовательного потребителя и утилитарных целей освещения.

## Литература


1. Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources // CIE13.2–1995. Vienna, Austria. 1995.
2. Wendy Davis, Yoshi Ohno. Color quality scale // Opt. Eng. 49, 033602 (2010); doi:10.1117/1.3360335.