

EBU

OPERATING EUROVISION AND EURORADIO

TECH 3354

COMPARISON OF CIE COLOUR METRICS FOR USE IN THE TELEVISION LIGHTING CONSISTENCY INDEX (TLCI-2012)

Внимание!

- Данный перевод **НЕ** претендует на аутентичность и может содержать отдельные неточности.
- Оригинал этого документа находится по адресу: <http://www.ebu.ch>

СРАВНЕНИЕ ЦВЕТОВОЙ МЕТРИКИ CIE ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНДЕКСЕ СОВМЕСТИМОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ОСВЕЩЕНИЯ (TLCI-2012)

Источник: FTV-LED

Женева
Ноябрь 2012

Содержание

Введение	3
1. Принцип индекса совместимости телевизионного освещения (TLCI-2012).....	3
2. Тестовая установка	3
2.1 Тестовые образцы	3
2.2 Тестовое и эталонное осветительное оборудование	3
2.3 Кривые чувствительности камеры	4
2.4 Матрица камеры	4
2.5 Гамма-коррекция камеры	4
2.6 Гамма дисплея	5
2.7 Основные цвета дисплея	5
3. Процедура тестирования	5
4. Анализ результатов	9
4.1 Анализ по отдельным участникам	9
4.2 Анализ по всем участникам	11
5. Библиография	13
Приложение 1: Спектральные характеристики тестовых осветительных приборов	15
Приложение 2: CIE1964.....	16
Приложение 3: CIELUV.....	17
Приложение 4: CIELAB.....	18
Приложение 5: CMC.....	19
Приложение 6: CIE1994.....	21
Приложение 7: CIEDE2000.....	22

Сравнение цветовой метрики CIE для использования в индексе совместимости телевизионного освещения (TLCI-2012)

Комитет EBU	Первый выпуск	Переработка	Переиздание
TC	2012		

Ключевые слова: TLCI-2012, Индекс совместимости телевизионного освещения, Колориметрия, Осветительные приборы.

Введение

Настоящий документ описывает экспертные оценки, проведенные в целях определения наиболее соответствующих цветовых показателей при оценке разницы в воспроизведении цвета, для использования в «индексе совместимости телевизионного освещения – 2012» (TLCI-2012).

1. Принцип индекса совместимости телевизионного освещения (TLCI-2012)

Цель TLCI-2012 – обеспечить способ оценки характеристики цветопередачи осветительных приборов в телевизионном освещении. Математическая симуляция имитирует телекамеры и дисплеи, используя лишь те параметры, которые влияют на цветовую характеристику. Этот метод вычисляет разницу в цветовом оттенке ряда тестовых цветовых образцов, освещенных по отдельности тестовым и эталонным приборами и показанных на эталонном дисплее.

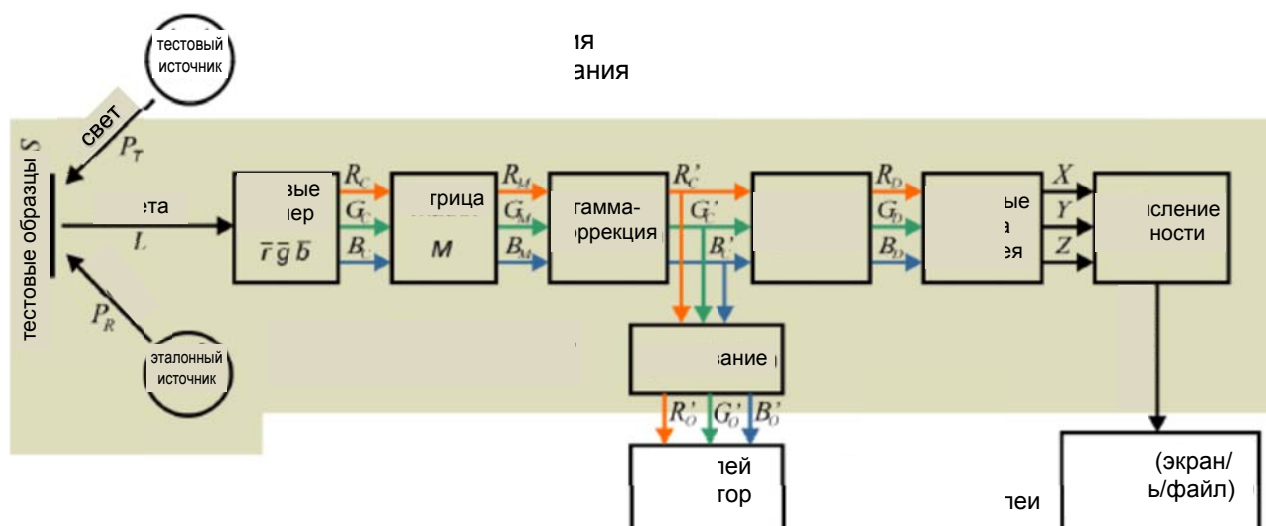


Рис. 1: Функциональная блок-схема TLCI-2012

Параметры телевизионного тракта здесь не принимались во внимание программное обеспечение TLCI-2012, описанное далее в EBU Tech 3355, было использовано только для формирования последовательности цветоразностных сигналов на экране компьютера или видеодисплея для экспертной оценки.

Для расчёта визуального представления цветоразностных сигналов применяются шесть различных алгоритмов CIE, детали которых даны в Приложениях. Самый старый из них – CIE1964 – использовался в работе CRI и TLCI, начатой Sproson и Taylor. Но последующие показатели признаны лучшими, т.к. ближе представляют человеческое зрение.

2. Тестовая установка

2.1 Тестовые образцы

Использовалось математическое представление таблицы ColorChecker®, т.к. она общепризнана и доступна в качестве тест-таблицы, хотя и не предназначалась для телевидения. Таблицы коэффициента отражения для цветовых образцов даны в документе EBU Tech 3355.

2.2 Тестовые и эталонные осветительные приборы

Испытуемые (тестовые) образцы номинально освещались тремя тестовыми источниками, каждый из которых обладал измеренной мощностью распределения энергии реального осветительного прибора.

Они были выбраны для представления хороших, плохих и нейтральных эксплуатационных свойств. Распределение спектральной мощности дано в Приложениях.

В каждом случае была вычислена коррелированная цветовая температура (CCT) тестового прибора, которая использовалась в качестве спецификации для эталонного оборудования. Метод вычисления CCT и распределения спектральной мощности стандартного источника дан в EBU Tech 3355.

2.3 Кривые чувствительности камеры

Вместо данных какой-либо реальной камеры были использованы типичные кривые чувствительности трубок типа Plumbicon®, взятые из работы Sproson/Taylor. Они имели лучшие оценки среди образцов реальных камер на то время (1970 – 1990), и не было особого повода считать, что данные для более современных камер будут отличаться. Были проведены измерения и более новых камерах, результаты можно посмотреть в EBU Tech 3353.

На Рис. 2 видно, что точный выбор кривых камеры не особо критичен и даже кривые с негатива киноплёнки дают похожие результаты. В этом тесте применялась разностная метрика CIEDE2000 для измерений на универсальном светодиодном осветительном приборе (однотоннобелом).

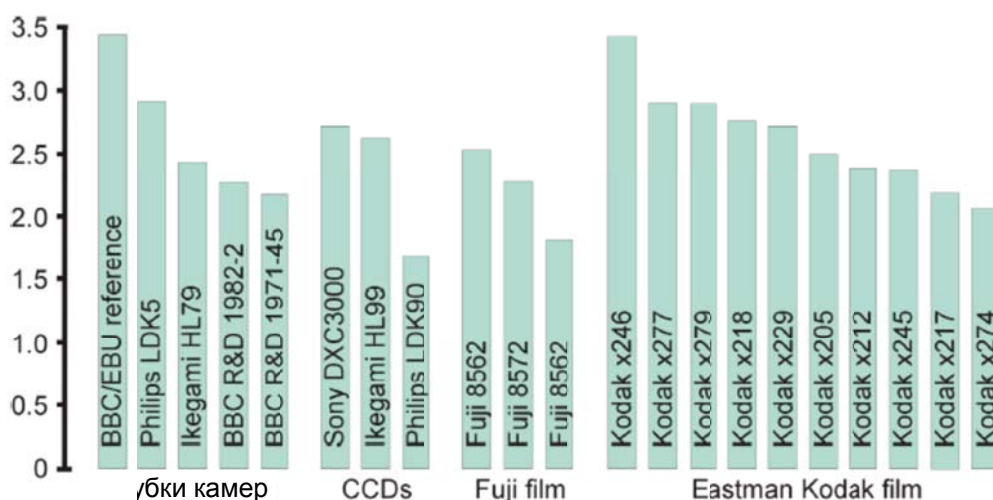


Рис. 2: Средние значения ΔE^* для различных образцов камер

Уровень баланса белого был установлен на 90%, что гарантирует, что уровень видео для пикового белого участка станет 100% (т.к. известно, что отражающая способность этого участка 90.01%).

2.4 Матрица камеры

Значения матрицы взяты из заключительного отчета Taylor (1988).

$$\begin{bmatrix} R_M \\ G_M \\ B_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.1380 & -0.1750 & 0.0370 \\ -0.1120 & 1.1510 & -0.0390 \\ 0.0000 & -0.0910 & 1.0910 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_S \\ G_S \\ B_S \end{bmatrix}$$

Где R_S , G_S и B_S – линейные сигналы из датчика(ов), а R_M , G_M и B_M – линейные сигналы выхода камеры. Поскольку эта матрица оптимизирована для линейной телевизионной системы, она создавала более насыщенные цвета, когда применялась в более реальной системе с гамма-коррекцией камеры и дисплея. Поэтому контроль насыщенности был установлен на 80%, что давало более реальную цветопередачу в тракте.

2.5 Гамма-коррекция камеры

Гамма-коррекция была установлена по уравнению из ITU-R BT.709, рекомендованному для всех систем HDTV или более новых.

$$V' = 1.099V^{0.45} - 0.099 \text{ для } V < 0.018, \text{ в других случаях } V' = 4.5V$$

Выходной сигнал программного обеспечения в реальном времени, представленный в форме R' , G' , B' , подавался из компьютера через VGA, DVI, HDMI или Viewport на телевизионный дисплей. Программа кодировала видео с квантованием ITU-R BT.709, 8-бит, формируя сигналы R_O' , G_O' и B_O' .

2.6 Гамма дисплея

Для вычисления цветовой характеристики гамма дисплея была установлена на 2.4, то есть:

$$V_D = V_C^{2.4}$$

На практике выбор гаммы дисплея, в общем-то неважен, т.к. заявленные значения цветоразности очень мало меняются между гаммой дисплея 2.2 и 2.8. На Рис. 3 показаны цветоразности, измеренные с помощью разностной метрики CIEDE2000, для стандартного светодиодного осветительного прибора (однотоннобелого).

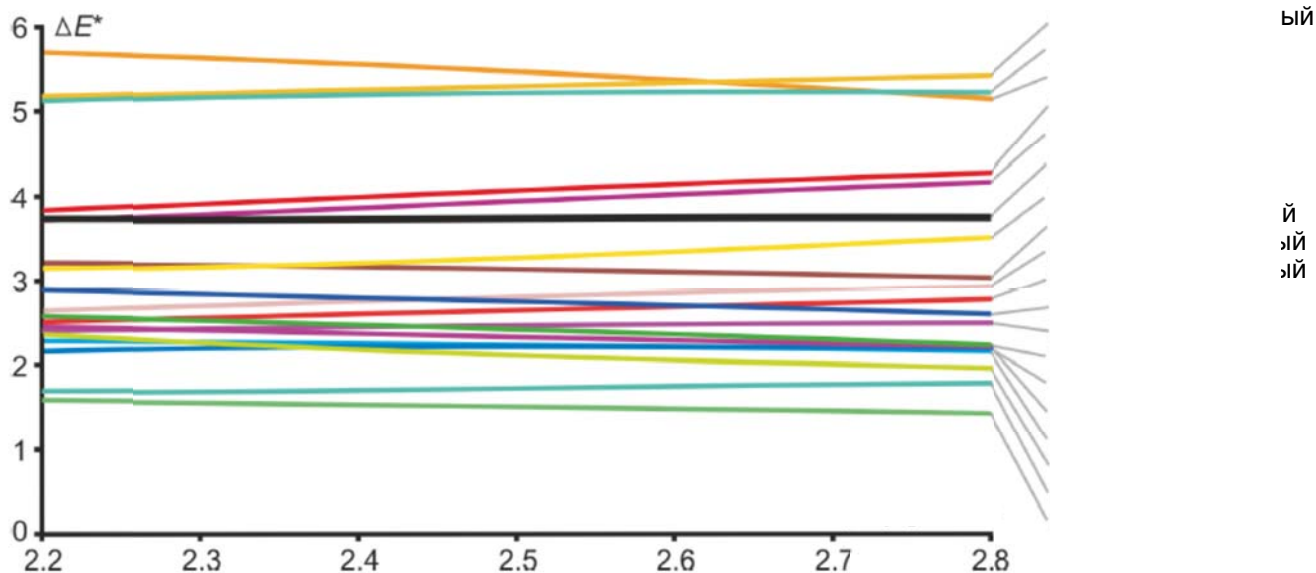


Рис. 3: Цветоразности ColorChecker® для стандартного светодиодного осветительного прибора (однотонно белого).

2.7 Основные цвета дисплея

Были выбраны основные цвета ITU-R BT.709.

	x	y
R	0.64	0.33
G	0.30	0.60
B	0.15	0.06
Баланс белого, D65	0.3127	0.3290

Матрица синтеза дисплея, полученная непосредственно из этих основных цветов и цветового баланса, такова:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412391 & 0.357584 & 0.180481 \\ 0.212639 & 0.715169 & 0.072192 \\ 0.019331 & 0.119195 & 0.950532 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_D \\ G_D \\ B_D \end{bmatrix}$$

и именно эти параметры трех основных цветов, X_T , Y_T , Z_T и X_R , Y_R , Z_R для тестового и эталонного приборов соответственно, использовались в расчёте разности цветовой характеристики и формулировки значения Q в TLCI-2012.

3. Процедура тестирования

Участники тестирования снабжались расчетной таблицей, содержащей все инструкции, необходимые для проведения теста, вместе с оценочными таблицами для каждого теста.

Каждого участника просили показать выход программного обеспечения TLCI-2012 (EBU Tech 3355) в обычном телевизоре или на мониторе, а не на компьютерном дисплее. В программе имелись сигнал генератора цветных полос SMPTE для корректной установки яркости и цвета дисплея.

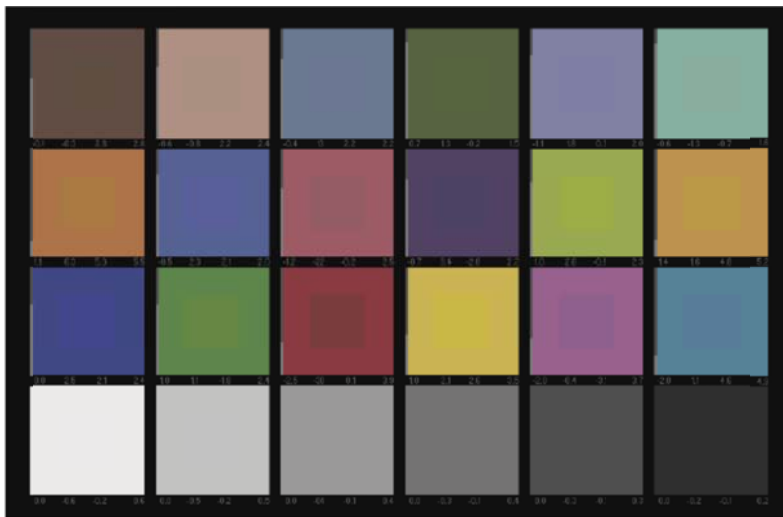


Рис. 4: Экран выхода TLCl для одноцветного, белого светодиода, CIEDE2000


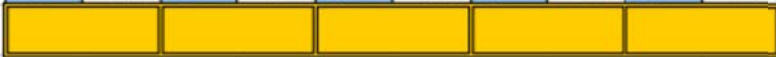










	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1		к	элый)			Эталон	AUTO CCT							
2		BBC 1988-2-3 :он												
3		а	CIEDE2000			метр			ΔE*					
4			l= 1	c= 1	h= 1									
5														
6														
7	Оценка метрического подсчета смежных по горизонтали пар цветных участков		ый	сный	эбо	за	цветок	зеленый						
8														
9		ΔE*	0.6	ΔE*	1.0	ΔE*	1.7	ΔE*	2.7	ΔE*	2.2	ΔE*	2.0	
10														
11			ий	асный	эвый	лennyй	во-желтый							
12														
13		ΔE*	2.1	ΔE*	1.2	ΔE*	0.8	ΔE*	3.0	ΔE*	2.2	ΔE*	4.5	
14														
15				ий	ий	ный	лубой							
16														
17		ΔE*	1.2	ΔE*	3.1	ΔE*	0.8	ΔE*	2.8	ΔE*	2.2	ΔE*	3.1	
18														
19														
20		Оценка метрического подсчета смежных по вертикали пар цветных участков												
21														
22														
23														
24														
25														
26		0	Средний			ΔE*	2.07							
27		0	Мин.			ΔE*	0.6							
28		0	Макс.			ΔE*	4.5							
29		#VALUE!												

Рис. 5: Расчетная и оценочная таблицы для флуоресцентного (ТВ белого), CIEDE2000

Выход программы TLCI-2102 был представлением таблицы ColorChecker®, обработанной софтом камеры. Каждый участок содержал цвет, анализируемый эталонным прибором, с врезкой того же цвета, анализируемой тестовым прибором. Под каждым участком были 4 цифры, вычисленные цветоразности ΔL^* , ΔC^* , ΔH^* и ΔE^* , слева направо, где для тестов использовалось только ΔE^* .

Было проведено 15 циклов тестов; по 5 для каждого из трех тестовых устройств, и в каждом использовались все показатели цветоразности CIE, кроме CIE1964.

Согласно Рис. 5, во всех расчетных таблицах ячейка B1 идентифицировала тестовое оборудование, а I1 – эталонное (стандартный источник с той же CCT, что и в тестовом оборудовании). Ячейки B3 и I3 определяли соответствующий цветоразностный показатель и параметр.

Участника просили вынести вердикт по соотношению между значениями ΔE^* , заявленными для двух смежных цветовых участков одновременно, в оранжевых ячейках (например, L23). Под каждым цветовым участком дано значение ΔE^* , и участника просили выбрать из таблицы вердиктов, которая является подмножеством 5-балльной шкалы:

Балл	Вердикт
+2	Согласен с цифрами, или очень близко
+1	Согласен с указанием, но не с цифрами
(0)	(оценки нет)
(-1)	(не разрешается)
-2	Не согласен с указаниями

Оценка “+2” означала, что участник согласен, что два значения ΔE^* корректно описывают отношение между двумя цветоразностями. Оценка “+1” означала, что в общем цифры были корректны в смысле соотношения разности, но не давали точного ощущения величины. Оценка “-2” означала, что значение чисел неверно (например, для двух телесных тонов разность для темного тона была более заметна, чем для светлого, в примере на Рис. 4 и 5).

Оценки “0” и “-1” были запрещены: “0” (пустое поле) использовалась для указания, что тест еще не проведен, а “-1” логически связана с вердиктом, что указание неверно, но цифры корректны, чего случиться не могло. Можно спорить, что оценка “0” может означать, что дать оценку слишком сложно, но в данном случае форсирование поляризованного балла не составило труда ни для одного участника.

Расчетная таблица представляла сумму всех оценок в ячейке B26. Ячейки B27 и B28 записывали максимальные и минимальные баллы, а H26-H28 – среднее и диапазон значений ΔE^* для теста. На практике в анализе использовалось только значение общего балла (ячейка B26). Таким образом, максимальный общий балл по каждому тесту составил $2 \times (3 \times 5 + 2 \times 6) = 54$.

После тестирования всех 15 комбинаций тестового оборудования и метрики цветоразности участника просили провести перекрестную проверку.

Для создания выходного сигнала программы TLCI-2012 использовалось каждое из трех тестовых устройств (см. Рис. 6), но на этот раз, опуская значения ошибок цветоразности. Затем участника просили присвоить число видимости цветоразности внутри каждого цветового участка. Инструкций не было; участник мог пользоваться любой шкалой и точностью. Все, о чем его просили – чтобы нумерация была согласованной. Участникам сказали, что это перекрестная проверка, источник данных, который может и будет использован для установления надежности результатов испытаний.

Во всех тестах, которые были самоуправляемыми, участник мог повторить любой тест, меняя результаты по необходимости.



Рис. 6: Экран выхода TLCI-2012 для одноцветного белого, светодиода LED, CIEDE2000, без отчетов об ошибках Δ

4. Анализ результатов

4.1 Анализ по отдельным участникам

По результатам каждого участника был сделан отдельный анализ, как показано на Рис. 7.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1			ная оценка			Высококач. источник LED	Флуоресцент, ТВ белый	Типичные белые LED	Среднее	Высококач. источник LED	Флуоресцент, ТВ белый	Типичные белые LED	Высококач. источник LED	Флуоресцент, ТВ белый	Типичные белые LED	Сумма
2						Δ средний			Δ PMR							
3					CIELUV	2.82	5.02	7.25	5.03	1.95	1.89	2.28	-14	10	24	20
4					CIELAB	2.31	4.39	5.86	4.19	2.08	1.93	1.60	-12	5	-3	-10
5					CMC	1.41	2.46	3.88	2.58	2.13	1.87	1.88	5	15	15	35
6					CIE1994	1.12	2.11	3.04	2.09	2.32	1.89	1.81	13	19	18	50
7					CIEDE2000	1.08	2.07	2.96	2.04	2.12	2.18	1.86	11	18	31	60

Рис. 7: Анализ оценок, участник 'N'

В колонках F – L записана статистика ошибок ΔE^* , которая не использовалась в дальнейшем анализе. В колонках M – O скопированы оценки из ячейки B26 каждой оценочной таблицы. В колонке P суммированы баллы между участками для каждой метрики цветоразности CIE.

Ожидалось стабильное увеличение этих уровней от CIELUV к CIEDE2000, и так в основном и произошло, за исключением, что CIELUV работало значительно лучше ожидаемого. Обратите внимание, что наивысший балл между участками для каждого устройства не обязательно совпадает с баллом суммы (например, зеленые ячейки M6, N6 и O7).

Этот результат графически представлен на Рис. 8.

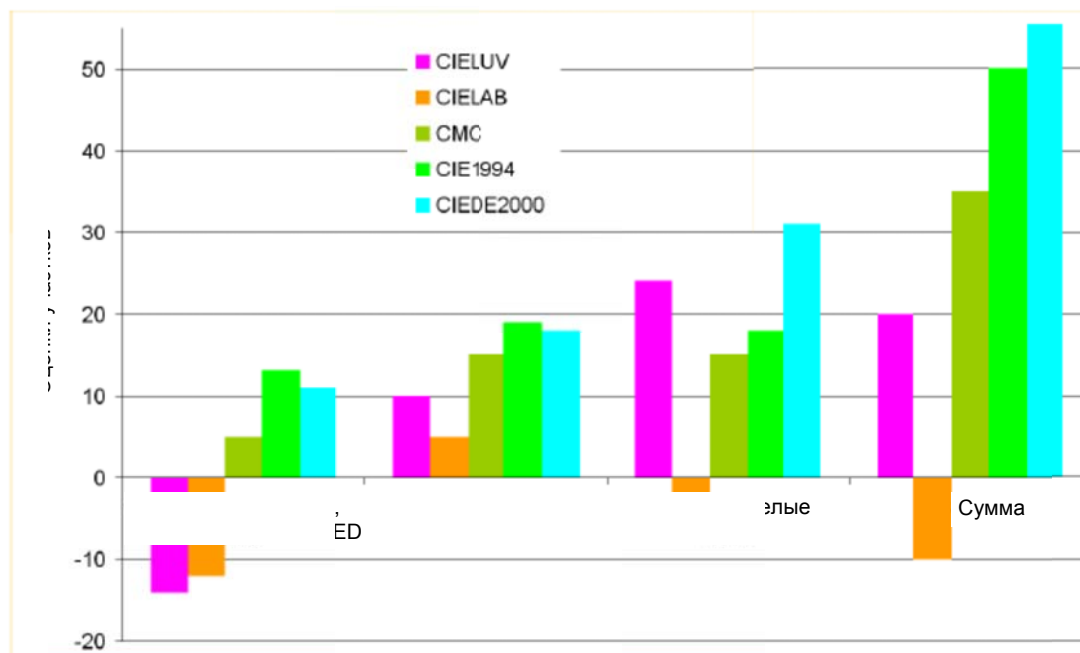


Рис. 8: Распределение баллов между участками для участника 'N'

Очевидно, что баллы между участками почти случайны для высококачественного прибора. Это почти неизбежно, т.к. почти все отдельные цветоразности малы, и их трудно оценить. Самая надежная оценка получается со стандартным светодиодным осветительным прибором (однотоннобелом), имеющим наибольшие ошибки характеристик и потому самые заметные цветоразности. Тем не менее, суммарный балл между участками показывает четкую прогрессию в сторону CIEDE2000. Самое странное, что CIELAB работает неизменно плохо, а CIELUV неизменно лучше. Ни одна из метрик не идеальна и даже не близка к этому.

Персональный рейтинг цветоразности участника (перекрестная проверка) записан в колонках С, I и O, голубых ячейках на Рис. 9. Эти значения обрабатываются как отдельная метрика, называемая здесь «Глазами».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
9																						
10			ачения ΔE^*																			
11			Оценки	аза	LUV	LAB	CMC	1994	2000	Глаза	LUV	LAB	CMC	1994	2000	Глаза	Gekko Kelvin Light 5600K					
12	1		эм. телесный	1.5	3.6	3.3	5.9	2.7	2.8	0.8	1.3	0.9	0.9	0.7	0.6	0.1	1.5	1.3	2.2	1.0	1.1	
13	2		лет. телесный	1.4	4.4	3.1	4.6	2.3	2.4	1	2.6	1.8	1.2	1.1	1.0	0.5	3.1	2.0	1.6	1.2	1.2	
14	3		Синее небо	1	4.1	3.6	3.1	2.4	2.2	0.5	3.8	3.2	2.6	2.0	1.7	0.2	1.3	0.8	0.5	0.5	0.5	
15	4		Листва	1.2	3.0	3.1	1.8	1.6	1.5	1.5	5.8	5.9	3.3	2.8	2.7	0	1.3	1.5	0.8	0.7	0.7	
16	5		иний цветок	1.5	5.7	4.2	2.4	2.2	2.1	1.4	6.2	4.9	2.7	2.4	2.2	0	1.7	1.4	1.1	0.9	0.9	
17	6		ине-зеленый	1.4	3.7	2.8	1.8	1.7	1.6	0.5	4.1	2.9	2.2	2.1	2.0	0.2	4.2	3.2	2.3	2.1	2.1	
18	7		Оранжевый	2	10.3	7.8	7.3	4.6	5.5	0.8	4.1	3.1	2.7	1.8	2.1	0	2.5	1.5	1.0	0.7	0.7	
19	8		илово-синий	1	7.9	7.2	3.4	2.9	2.0	0.5	4.1	4.0	2.0	1.7	1.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	
20	9		ер.. красный	2	9.7	5.6	2.9	2.6	2.5	0.5	2.6	1.6	0.9	0.8	0.8	0.5	3.2	2.0	1.0	0.9	0.9	
21	10		Фиолетовый	1.8	3.8	2.8	2.5	2.0	2.2	1	6.7	5.0	2.9	2.6	3.0	1	5.1	4.8	3.0	2.4	2.3	
22	11		элто-зеленый	1.6	6.4	7.4	2.8	2.4	2.3	1.2	7.1	8.0	2.9	2.4	2.2	0	2.5	3.0	1.1	0.9	0.9	
23	12		анж.-желтый	2	10.3	9.0	5.6	4.6	5.3	1.5	9.5	7.9	4.6	4.0	4.5	0	1.8	1.7	0.7	0.5	0.5	
24	13		Синий	1	7.8	8.7	3.6	2.9	2.4	1.2	2.1	3.4	1.8	1.4	1.2	0.5	2.0	1.9	0.9	0.7	0.5	
25	14		Зеленый	1.6	4.8	4.9	2.5	2.5	2.4	1.5	8.1	8.5	3.6	3.1	3.1	0.2	3.0	3.2	1.3	1.1	1.1	
26	15		Красный	3	16.5	9.1	5.5	4.4	3.9	0	3.3	2.0	1.0	0.8	0.8	1.5	5.5	3.0	1.9	1.5	1.3	
27	16		элто-зеленый	2	9.1	9.4	3.9	3.4	3.5	1.6	7.6	7.4	3.1	2.7	2.8	0	1.6	1.9	0.7	0.5	0.5	
28	17		Пурпурный	2.5	10.9	6.0	4.0	4.0	3.7	0.2	7.4	4.7	2.4	2.4	2.2	1.3	5.1	4.2	2.1	1.9	1.9	
29	18		Голубой	2.8	8.5	7.5	6.2	5.5	4.9	2	4.0	3.9	3.4	3.2	3.1	0	5.0	3.8	3.0	2.6	2.3	
30	Correlation coefficient, Eyes with metric			0.732	0.447	0.525	0.747	0.697			0.391	0.581	0.663	0.659	0.644		0.668	0.504	0.382	0.415	0.395	
31																						

Рис. 9: Рейтинги «Глаз» для участника 'N'

Каждая колонка «Глаз» сравнивалась со значениями ΔE^* для каждой метрики, и коэффициенты корреляции записывались в строке 30. Положительное значение обозначает общее согласие; максимально возможное значение 1 – идеальное соответствие. Пока неясно, что могут означать эти результаты, кроме того, что ни одна из метрик не особенно коррелируется с визуальной характеристикой участника 'N'.

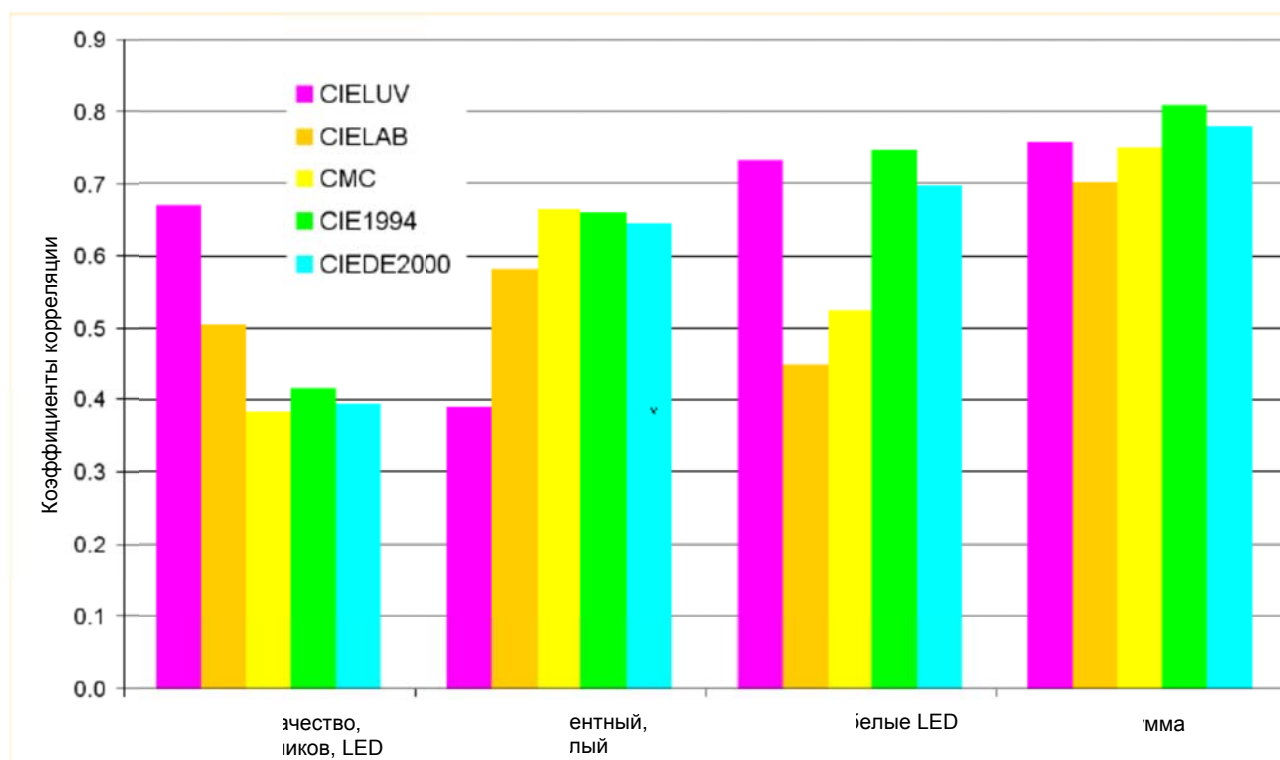


Рис. 10: Коэффициенты корреляции «Глаз» для участника 'N'

На Рис. 11 представлен дальнейший анализ, который, однако, более показателен.

На Рис. 11 содержимое ячеек R3 – T7 скопировано из строки 30 каждого устройства на рис. 9. Ячейки U3 – U7 – это коэффициенты корреляции между значениями «Глаз» в колонках D, J и P на Рис. 9 и значениями ΔE^* для каждой метрики, по всем трем приборам совокупно. Строка 8 показывает коэффициенты корреляции для каждого прибора между баллами меж участками (колонки M – O) и коэф-

коэффициенты корреляции «Глаз» (колонки R – T). Это выявляет сложность оценки небольших цветоразностей для высококачественного прибора. Ячейка W8 показывает коэффициент корреляции для всех устройств (колонки P и U). Это значение показывает качество наблюдений.

	C	D	E	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	актив-ценка			Высокое качество, много источников, LED	Флуоресцентный ТВ белый	Типичные белые LED	Сумма		Высокое качество, много источников, LED	Флуоресцентный ТВ белый		Все устройства		
2	Балл						реляции							
3	CIELUV			-14	10	24	20		0.668	0.581	0.732	0.757		
4	CIELAB			-12	5	-3	-10		0.504	0.581	0.447	0.701		
5	CMC			5	15	15	35		0.382	0.663	0.525	0.750		
6	CIE1994			13	19	18	50		0.415	0.659	0.747	0.809		
7	CIEDE2000			11	18	31	60		0.395	0.644	0.697	0.780		
8									-0.85	0.89	0.82			0.89

Рис. 11: Вторичные коэффициенты корреляции «Глаз» для участника 'N'

Однако для получения выводов необходим анализ всей группы участников.

4.2 Анализ по всем участникам

На Рис. 12 показана первая часть общего анализа. В ячейках W3 – T7 скопированы значения из ячеек P3 – P7 индивидуальных таблиц анализа. Значения в строке 8 скопированы из ячейки W8 индивидуальных таблиц. Было принято произвольное решение классифицировать участников с коэффициентами корреляции выше +0.75 как «очень хороших», от +0.5 до +0.75 как «хороших», от +0.25 до +0.5 как «средних», а менее +0.25 (включая все отрицательные значения) как плохих. Для ясности ячейки выделены разными цветами.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	ва																				Средние баллы по ячейкам		
2	Метрика	A1	A2	B	C	D	E	F	G1	G2	G3	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Select	ALL	
3	CIELUV	75	97	95	127	58	30	38	50	41	11	77	42	49	79	59	24	20	15	16	0.98	0.98	
4	CIELAB	56	25	86	108	30	16	40	55	17	-13	27	18	29	30	47	-4	-10	-5	3	0.61	0.54	
5	CMC	92	95	72	118	51	34	65	1	49	56	95	62	56	70	63	14	35	-1	19	0.98	1.02	
6	CIE1994	101	74	99	119	74	45	71	53	63	59	94	60	59	66	71	32	50	45	26	1.22	1.23	
7	CIEDE2000	133	108	117	121	47	54	84	99	70	89	111	80	59	75	82	45	60	43	39	1.48	1.48	
8	Corr Coeff	0.455	0.004	0.650	0.593	0.158	0.590	0.685	0.542	0.136	0.256	0.803	0.567	0.656	0.503	0.563	0.820	0.891	0.475	0.527			
9	Рейтинг	Med	Poor	Good	Good	Poor	Good	Good	Good	Poor	Poor	VG	Good	Good	Good	Good	VG	VG	Med	Good			
10	Пол	M	M	F	M	M+F	M	M	M	M	M	M	F	F	M	M	M	M	F	M			
11	Дисплей	Plasma	LCD	Plasma	Plasma	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD	Plasma	Plasma	LCD	Plasma	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD			
12	Тип	TV	TV	TV	TV	TV	Mon	Mon	Mon	Mon	Mon	TV	TV	Mon	TV	Mon	Mon	Mon	Mon	Mon			

Рис. 12: Анализ всех участников по баллам между участками

Эта классификация в некоторой степени обусловлена типом дисплея. Участники A, B, C, H, I и K пользовались бытовыми телевизорами; остальные – профессиональными телемониторами. На этой основе A2 (участник A, второй тест) и D получили плохие баллы, возможно, из-за несогласованных цветов в бытовых ЖК дисплеях вследствие их ограниченного угла просмотра. E-G, J и L-P пользовались профессиональными телемониторами с задней LED-подсветкой в контролируемой среде, остальные – в домашних условиях.

На Рис. 13 показаны средние баллы между участками по всем трем устройствам и всем участникам (ячейки W3 – W7) и только для тех, кто получил оценку от «средне» до «очень хорошо». Тенденция очевидна; CIEDE2000 превосходит другие метрики, а CIELAB – хуже всего.

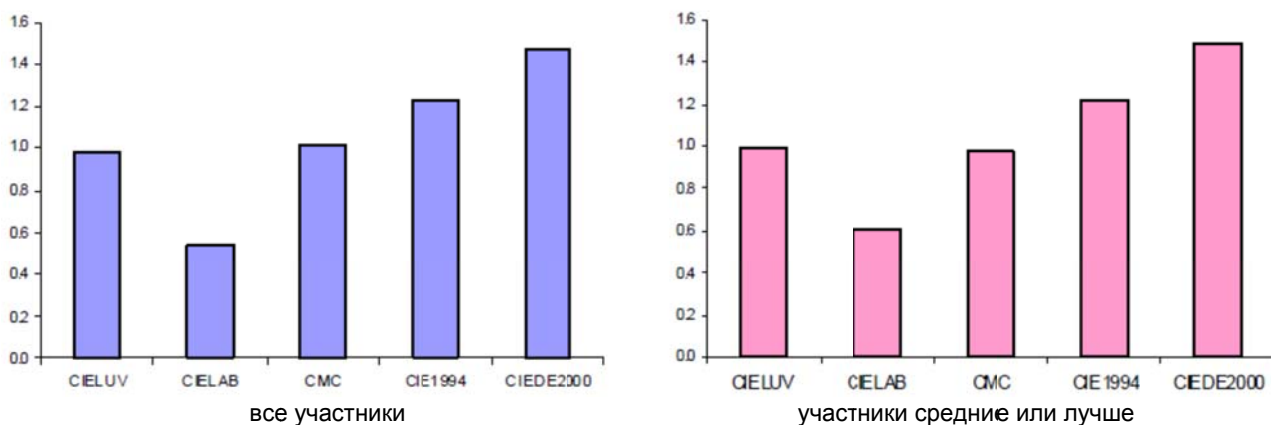


Рис. 13: Баллы между участками для всех устройств

Поскольку уже было установлено, что оценка небольших ошибок ΔE^* для высококачественных светодиодных приборов затруднена, имеет смысл исключить это устройство из дальнейшего анализа.

На Рис. 14 аналогично показаны средние баллы между участками для одноцветного белого светодиода и флуоресцентной трубки, по всем участникам (ячейки W3 – W7) и только с оценками от «средне» до «очень хорошо». Здесь очевидно, что CIELAB работает плохо, хотя CIEDE2000 лишь ненамного лучше, когда ошибки ΔE^* меньше, как с флуоресцентной трубкой.

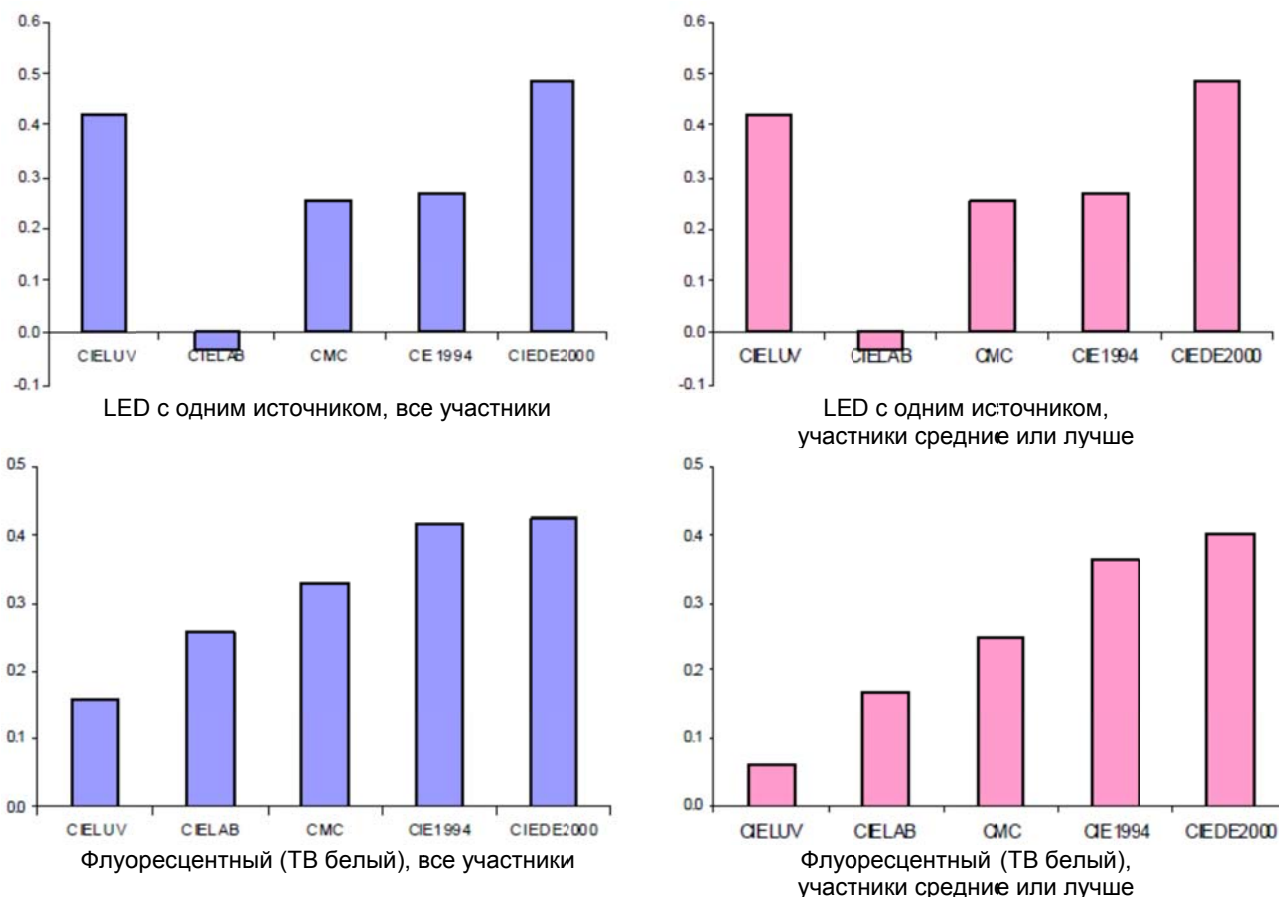


Рис. 14: Баллы между участками для светодиода с одним источником (вверху) и флуоресцентным (ТВ белый) (внизу)

Далее, коэффициенты корреляции (ячейки B8 – T8) использовались в качестве взвешивающих параметров для баллов между участками по всем участникам и устройствам.

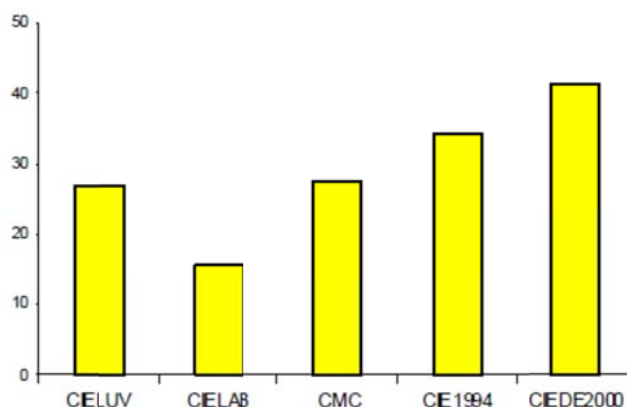


Рис. 15: Баллы между участками, взвешенные коэффициентами корреляции, по всем участникам и устройствам

Здесь опять лучше всех работает CIEDE2000, а хуже – CIELAB.

Далее были исключены наблюдения с наименьшим коэффициентом корреляции, ниже +0.25, и на Рис. 16 показаны баллы между участками, взвешенные коэффициентами корреляции, для одноцветного белого светодиода и флуоресцентной трубки. Лучше всех опять CIEDE2000, хотя CIELUV работает на удивление хорошо для оценки самых больших ошибок ΔE^* с одноцветным светодиодом.

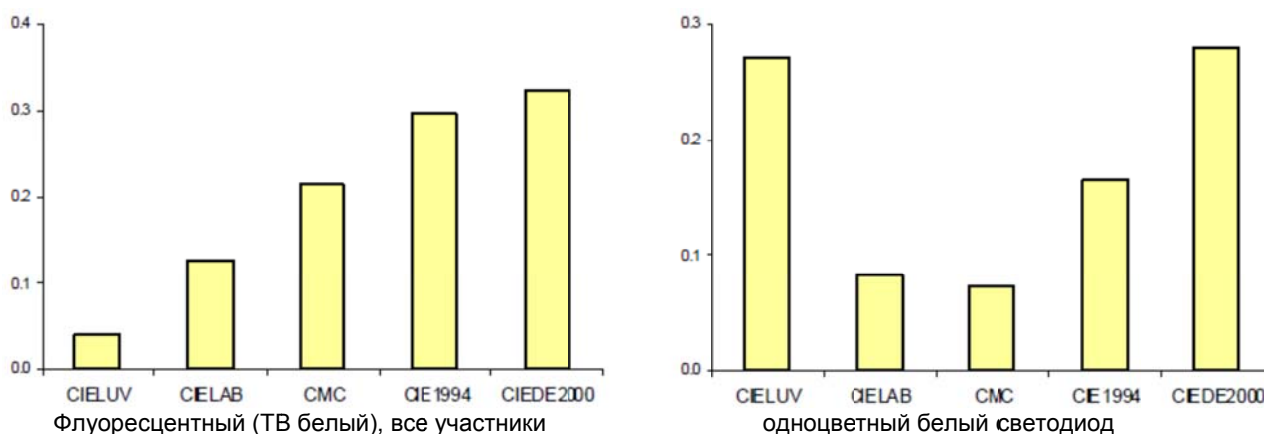


Рис. 16: Баллы между участками, взвешенные коэффициентами корреляции, исключая «плохие» наблюдения

Понятно, что сместить CIEDE2000 с верхней позиции, а CIELAB с нижней трудно, однако данные обрабатываются. CIELUV работает лучше ожидаемого, когда видимые ошибки большие, но не когда они меньше. Поэтому CIEDE2000 был выбран для использования в индексе совместимости телевизионного освещения, TLCI-2012.

5. Библиография

Sproson, W. N. & Taylor, E. W. (1971)	A colour television illumination consistency index.	<i>BBC Research Department Report 1971-45</i>
Taylor, E. W. (1982)	Rank order difference analysis applied to tests of the Television Consistency Index	<i>BBC Research Department Report 1982-10</i>
Taylor, E. W. (1988)	The assessment of the colorimetric properties of light sources for use in television scene lighting	<i>BBC Research Department Report 1988-2</i>
CIE, 1995	Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources (Ed. 2)	<i>Публикация CIE № 13.3 (TC-3.3), Bureau Central de la CIE, Париж, 1995.</i>
Roberts, A., Emmett, J. & Böhrer, P (2011)	A Television Lighting Consistency Index	<i>Протоколы, IBC 2011, Амстердам</i>
Roberts, A. (2011)	Why does it take so long to get a new standard adopted?	<i>The Iris, Creative Video Productions Ltd, III кв. 2011</i>

CIE, 2004	Colorimetry	<i>Publication No. 15.3, Bureau Central de la CIE, Париж, 2004.</i>
McCamy, C. S., Marcus, H. & Davidson, J. G.	A color-rendition chart	<i>Journal of Applied Photographic Engineering, Vol. 2, #3, лето 1976.</i>
CIE, 2001	Improvement to industrial colour-difference evaluation	<i>CIE Publication No. 142-2001, Bureau Central de la CIE, Париж, 2001</i>
EBU, 2012	Television Lighting Consistency Index-2012	<i>EBU Tech 3355</i>
Roberts, A.	Circles of Confusion	<i>EBU, 2009</i>
Wyszecki, G. & Styles, W. S. (1982)	Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, (Ed. 2)	<i>John Wiley & sons, 2008</i>
Reinhard, E., Khan, E. A., Akyüz, A. O. & Johnson, G. M.	Color imaging, fundamentals and applications	<i>A. K.Peters, 2008</i>

Приложение 1: Спектральные характеристики тестовых осветительных приборов

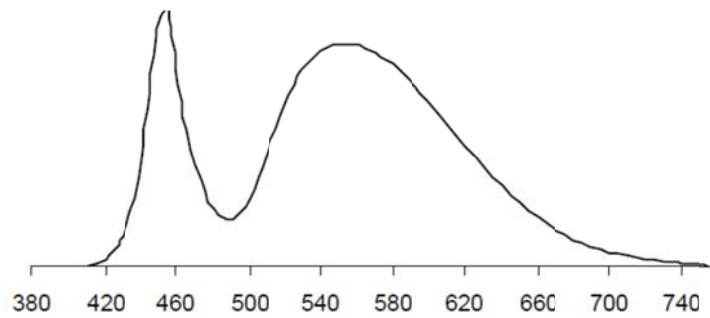


Рис. А1.1: Типичное одноцветное устройство с белым светодиодом

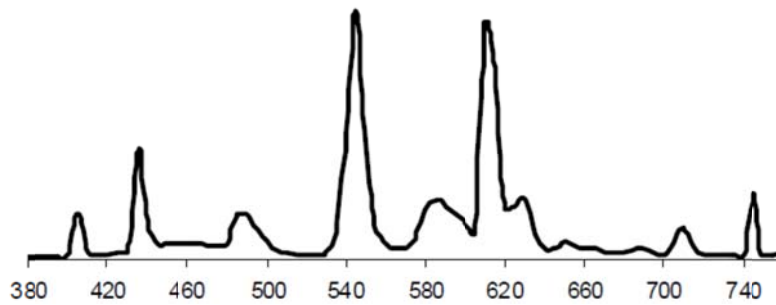


Рис. А1.2: Флуоресцентный, «ТВ белый»

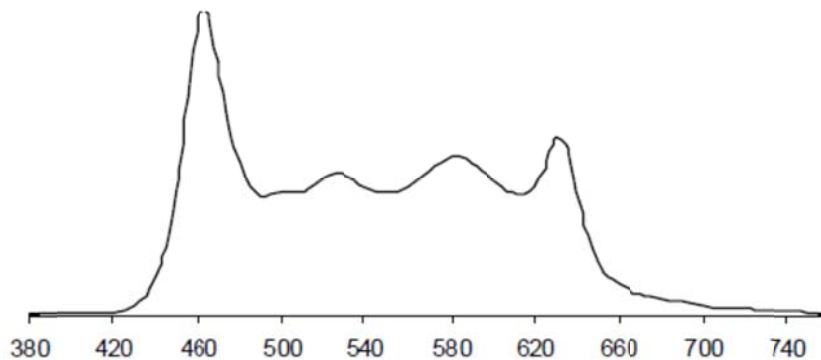


Рис. А1.3 Высококачественное светодиодное устройство со множеством источников

Приложение 2: CIE1964

Этот процесс использовался в оригинальном, 1971, отчете BBC о разработке индекса совместимости телевизионного освещения и используется в индексе цветовоспроизведения.

Обратите внимание, что в этом методе значения для XYZ масштабированы до 100 (т.е. Y = 100 для пикового белого).

- Сначала выведем значения цветности CIE1960 для тестового цвета для освещения тестовым источником (нижний индекс T) и эталонным источником (нижний индекс R). Нижний индекс W относится к белой точке.

$$u_T = \frac{4X_T}{X_T + 15Y_T + 3Z_T}, \quad v_T = \frac{6Y_T}{X_T + 15Y_T + 3Z_T}$$

$$u_R = \frac{4X_R}{X_R + 15Y_R + 3Z_R}, \quad v_R = \frac{6Y_R}{X_R + 15Y_R + 3Z_R}$$

- Вычислим значения CIE1964 для цветовых выборок с тестовым и эталонным освещением:

$$W_T^* = 25(Y_T)^{1/3} - 17, \quad W_R^* = 25(Y_R)^{1/3} - 17$$

$$U_T^* = W_T^*(u_T - u_W), \quad U_R^* = W_R^*(u_R - u_W)$$

$$V_T^* = W_T^*(v_T - v_W), \quad V_R^* = W_R^*(v_R - v_W)$$

Где u_W и v_W – координаты цветности белой точки дисплея.

- Вычислим общую цветоразность для тестового цвета:

$$\text{Общая разность: } \Delta E^*_{64} = \sqrt{(13(U_T^* - U_R^*))^2 + (13(V_T^* - V_R^*))^2 + (W_T^* - W_R^*)^2}$$

Примечание: CIE1964 не вычисляет Chroma или Hue, которые требуются в вычислениях TLCI-2012.

Приложение 3: CIELUV

Обратите внимание, что в этом методе значения для XYZ масштабированы до 100 (т.е. $Y = 100$ для пикового белого).

- Сначала выведем значения цветности CIE1976 для тестового цвета для освещения тестовым источником (нижний индекс T) и эталонным источником (нижний индекс R). Нижний индекс W относится к белой точке.

$$u'_T = \frac{4X_T}{X_T + 15Y_T + 3Z_T}, \quad v'_T = \frac{9Y_T}{X_T + 15Y_T + 3Z_T}$$

$$u'_R = \frac{4X_R}{X_R + 15Y_R + 3Z_R}, \quad v'_R = \frac{9Y_R}{X_R + 15Y_R + 3Z_R}$$

- Вычислим значения CIELUV для цветовых выборок с тестовым и эталонным освещением:

Где, если $f(x) < \left(\frac{24}{116}\right)^3$ то $f(x) = \frac{1}{3}\left(\frac{116}{24}\right)x + \frac{16}{116}$, $\therefore f(x) = (x)^3$

$$u_T^* = 13L_T^*(u'_T - u'_W), \quad u_R^* = 13L_R^*(u'_R - u'_W)$$

$$v_T^* = 13L_T^*(v'_T - v'_W), \quad v_R^* = 13L_R^*(v'_R - v'_W)$$

Где Y_W, u'_W и v'_W – координаты яркости и цветности белой точки дисплея в значениях CIE1976.

$$C^*_T = \sqrt{u^{*2}_T + v^{*2}_T}, \quad C^*_R = \sqrt{u^{*2}_R + v^{*2}_R}$$

$$h_T = \arctan\left(\frac{v^*_T}{u^*_T}\right), \quad h_R = \arctan\left(\frac{v^*_R}{u^*_R}\right)$$

Примечание: угол цветного тона h измеряется в градусах.

- Вычислим общую цветоразность для тестового цвета:

$$\Delta E^*_{LUV} = \sqrt{(L^*_T - L^*_R)^2 + (u^*_T - u^*_R)^2 + (v^*_T - v^*_R)^2}$$

- Вычислим отдельные разности Lightness, Chroma и Hue для тестового цвета:

$$\Delta L^*_{LUV} = L^*_T - L^*_R$$

$$\Delta C^*_{LUV} = 13 \left(L^*_T \sqrt{(u'_T - u'_W)^2 + (v'_T - v'_W)^2} - L^*_R \sqrt{(u'_R - u'_W)^2 + (v'_R - v'_W)^2} \right)$$

$$\Delta H^*_{LUV} = 2 \sin\left(\frac{h_T - h_R}{2}\right) \sqrt{C^*_T \cdot C^*_R}$$

Приложение 4: CIELAB

Этот процесс, разработанный и принятый CIE в 1976 г., обеспечивает основу для всех дальнейших разработок в измерении цветоразности.

- Вычислим значения CIELAB для цветовых выборок с тестовым и эталонным освещением:

$$L^*_T = 116f(Y_T/Y_W) - 16, \quad L^*_R = 116f(Y_R/Y_W) - 16$$

Где, если $f(x) < \left(\frac{24}{116}\right)^3$ то $f(x) = \frac{1}{3}\left(\frac{116}{24}\right)^3 x + \frac{16}{116}$, е $f(x) = (x)^3$

$$a^*_T = 500\left(f\left(\frac{X_T}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right)\right), \quad a^*_R = 500\left(f\left(\frac{X_R}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right)\right)$$

$$b^*_T = 200\left(f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_T}{Z_W}\right)\right), \quad b^*_R = 200\left(f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_R}{Z_W}\right)\right)$$

Где X_w, Y_w, Z_w – параметры 3-х основных цветов значения белой точки дисплея.

$$C^*_T = \sqrt{a^{*2}_T + b^{*2}_T}, \quad C^*_R = \sqrt{a^{*2}_R + b^{*2}_R}$$

$$h_T = \arctan\left(\frac{b^*_T}{a^*_T}\right), \quad h_R = \arctan\left(\frac{b^*_R}{a^*_R}\right)$$

Примечание: угол цветного тона h измеряется в градусах.

- Вычислим общую цветоразность для тестового цвета:

$$\Delta E^*_{LAB} = \sqrt{(L^*_T - L^*_R)^2 + (a^*_T - a^*_R)^2 + (b^*_T - b^*_R)^2}$$

- Вычислим отдельные разности Lightness, Chroma и Hue для тестового цвета:

$$\Delta L^*_{LAB} = L^*_T - L^*_R$$

$$\Delta C^*_{LAB} = C^*_T - C^*_R$$

$$\Delta H^*_{LAB} = 2 \sin\left(\frac{h^*_T - h^*_R}{2}\right) \sqrt{C^*_T \cdot C^*_R}$$

Приложение 5: СМС

Этот процесс, разработанный Обществом красильщиков и колористов и принятый CIE в 1988 г., считается модернизацией предыдущих методов. Он делит пространство цветов CIELAB на бесконечное множество эллипсоидных микропространств (по одному на каждый тестовый цвет), оси которых наклонены и масштабированы для соответствия восприятию небольших цветоразностей.

- Вычислим значения CIELAB для цветовых выборок с тестовым и эталонным освещением:

$$L^*_T = 116f(Y_T/Y_W) - 16, \quad L^*_R = 116f(Y_R/Y_W) - 16$$

Где, если $f(x) < \left(\frac{24}{116}\right)^3$ то $f(x) = \frac{1}{3}\left(\frac{116}{24}\right)^3 x + \frac{16}{116}$, иначе $f(x) = (x)^3$

$$a^*_T = 500\left(f\left(\frac{X_T}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right)\right), \quad a^*_R = 500\left(f\left(\frac{X_R}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right)\right)$$

$$b^*_T = 200\left(f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_T}{Z_W}\right)\right), \quad b^*_R = 200\left(f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_R}{Z_W}\right)\right)$$

Где X_w, Y_w, Z_w – параметры 3-х основных цветов белой точки дисплея.

$$C^*_T = \sqrt{a^{*2}_T + b^{*2}_T}, \quad C^*_R = \sqrt{a^{*2}_R + b^{*2}_R}$$

$$h_T = \arctan\left(\frac{b^*_T}{a^*_T}\right), \quad h_R = \arctan\left(\frac{b^*_R}{a^*_R}\right)$$

Примечание: угол цветного тона h измеряется в градусах.

- Вычислим отдельные разности Lightness, Chroma и Hue для тестового цвета:

$$\Delta L^*_{LAB} = L^*_T - L^*_R$$

$$\Delta C^*_{LAB} = C^*_T - C^*_R$$

$$\Delta H^*_{LAB} = 2 \sin\left(\frac{h^*_T - h^*_R}{2}\right) \sqrt{C^*_T \cdot C^*_R}$$

- Вычислим скейлеры для эллипсоидных полуосей для тестируемого цвета, в каждом случае, значения берутся для средних колориметрических значений:

$$S_L = \frac{0.040975L^*}{1 + 0.01765L^*}, \quad \text{если не } L^* < 16, \quad \text{когда } S_L = 0.511$$

$$S_C = \frac{0.0638C^*}{1 + 0.013C^*} + 0.638$$

$$F = \sqrt{\frac{C^{*4}}{C^{*4} + 1900}}$$

$$T = 0.36 + \text{abs}(0.4 \cos(35 + h^*)) \quad \text{не } h^* > 164 \quad \text{и } h^* < 345, \\ \text{огда } T = 0.56 + \text{abs}(0.2 \cos(168 + h^*))$$

$$S_H = S_C(F T + 1 - F)$$

- Вычислим результирующее значение разности:

$$\text{разность: } \Delta E^*_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*_{LAB}}{lS_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{LAB}}{cS_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{LAB}}{S_H}\right)^2}$$

Где значения l и c – коэффициенты взвешивания, обычно единичные.

Они могут меняться для подгонки метрики, изменяя эффекты осветления и цветности соответственно.

Если они изменяются с единицы, их значения должны быть включены в название системы, например, CMC(2:1).

Для субъективных тестов $l = c = 1$.

Приложение 6: CIE1994

Это доработка процесса, определенного в СМС. Предназначена для просмотра D65, поэтому подходит для телевидения. Значение ΔE^* должно совпадать с человеческим зрением так, чтобы значение 1 было порогом распознавания.

- Вычислим значения CIELAB для цветовых выборок с тестовым и эталонным освещением:

$$L^*_T = 116f(Y_T/Y_W) - 16, \quad L^*_R = 116f(Y_R/Y_W) - 16$$

Где, если $f(x) < \left(\frac{24}{116}\right)^3$ то $f(x) = \frac{1}{3}\left(\frac{116}{24}\right)^3 x + \frac{16}{116}$, иначе: $f(x) = (x)^3$

$$a^*_T = 500 \left(f\left(\frac{X_T}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right) \right), \quad a^*_R = 500 \left(f\left(\frac{X_R}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right) \right)$$

$$b^*_T = 200 \left(f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_T}{Z_W}\right) \right), \quad b^*_R = 200 \left(f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_R}{Z_W}\right) \right)$$

Где X_w, Y_w, Z_w – параметры 3-х основных цветов белой точки дисплея.

$$C^*_T = \sqrt{a^{*T^2} + b^{*T^2}}, \quad C^*_R = \sqrt{a^{*R^2} + b^{*R^2}}$$

$$h_T = \arctan\left(\frac{b^*_T}{a^*_T}\right), \quad h_R = \arctan\left(\frac{b^*_R}{a^*_R}\right)$$

$$\Delta L^*_{LAB} = L_T - L_R$$

Примечание: угол цветного тона h измеряется в градусах.

- Вычислим скейлеры для эллипсоидных полуосей для тестируемого цвета, в каждом случае, значения берутся для средних колориметрических значений:

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0.045\sqrt{C^*_T \cdot C^*_R}$$

$$S_H = 1 + 0.015\sqrt{C^*_T \cdot C^*_R}$$

- Вычислим отдельные разности Lightness, Chroma и Hue для тестового цвета:

$$\Delta L^*_{94} = L^*_T - L^*_R$$

$$\Delta C^*_{94} = C^*_T - C^*_R$$

$$\Delta H^*_{94} = 2 \sin\left(\frac{h^*_T - h^*_R}{2}\right) \sqrt{C^*_T \cdot C^*_R}$$

- Вычислим результирующее значение разности:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*_{94}}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{94}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{94}}{k_H S_H}\right)^2}$$

Где значения k обычно единичны, но могут меняться для подгонки вычисления.

Если значения k изменяются с единицы, то их значения должны быть включены в обозначение системы, например, CIE1994(2:1:1).

Для субъективных тестов $k_L = k_C = k_H = 1$.

Приложение 7: CIEDE2000

Это дальнейшее уточнение CIELAB для улучшения корреляции между метрикой и человеческим зрением в насыщенных синих и почти нейтральных цветных участках.

- Вычислим значения CIELAB для цветных выборок с тестовым и эталонным освещением:

$$L^*_T = 116f(Y_T/Y_W) - 16, \quad L^*_R = 116f(Y_R/Y_W) - 16$$

Где, если $f(x) < \left(\frac{24}{116}\right)^3$ то $f(x) = \frac{1}{3}\left(\frac{116}{24}\right)^3 x + \frac{16}{116}$, иначе $f(x) = (x)^3$

$$a^*_T = 500\left(f\left(\frac{X_T}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right)\right), \quad a^*_R = 500\left(f\left(\frac{X_R}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right)\right)$$

$$b^*_T = 200\left(f\left(\frac{Y_T}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_T}{Z_W}\right)\right), \quad b^*_R = 200\left(f\left(\frac{Y_R}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_R}{Z_W}\right)\right)$$

Где X_w, Y_w, Z_w – параметры 3-х основных цветов белой точки дисплея.

$$C^*_T = \sqrt{a^{*2}_T + b^{*2}_T}, \quad C^*_R = \sqrt{a^{*2}_R + b^{*2}_R}$$

$$h_T = \arctan\left(\frac{b^*_T}{a^*_T}\right), \quad h_R = \arctan\left(\frac{b^*_R}{a^*_R}\right)$$

Примечание: угол цветного тона h измеряется в градусах.

- Вычислим нелинейные модификаторы для тестируемого цвета:

$$L'_T = L^*_T, \quad L'_R = L^*_R$$

$$\overline{C^*} = \frac{C^*_T + C^*_R}{2}$$

$$g = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C^{*7}}}{\overline{C^{*7}} + 25^7}} \right)$$

$$C'_T = \sqrt{(1+g)a^{*2}_T + b^{*2}_T}, \quad C'_R = \sqrt{(1+g)a^{*2}_R + b^{*2}_R}$$

$$h'_T = \arctan\left(\frac{b^*_T}{(1+g)a^*_T}\right), \quad h'_R = \arctan\left(\frac{b^*_R}{(1+g)a^*_R}\right)$$

Примечание: h^ измеряется в градусах, а не в радианах. Знаки a^* и b^* необходимо наблюдать для генерирования угла в диапазоне 0 – 360 градусов.*

$$\bar{L}' = \frac{L'_T + L'_R}{2}, \quad \bar{C}' = \frac{C'_T + C'_R}{2}, \quad \bar{h}' = \frac{h'_T + h'_R}{2}$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}$$

$$\Delta\Theta = 30 \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}' - 275}{25}\right)^2\right)$$

$$R_T = -R_C \sin(2\Delta\Theta)$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6) - 0.2 \cos(4\bar{h}' - 63)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015C^*T$$

- Вычислим отдельные разности Lightness, Chroma и Hue для каждого цвета:

$$\Delta L^*_{2000} = L'_T - L'_R$$

$$\Delta C^*_{2000} = C'_T - C'_R$$

$$\Delta H^*_{2000} = 2 \sin\left(\frac{h'_T - h'_R}{2}\right) \sqrt{C'_T \cdot C'_R}$$

- Вычислим результирующее значение разности:

$$\text{разность: } \Delta E^*_{2000} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*_{2000}}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{2000}}{k_C S_C}\right)^2 + \Delta H^*_{2000}{}^2 + R_T \Delta C^*_{2000} \Delta H^*_{2000}}$$

Где значения k – коэффициенты взвешивания, обычно единичны.

Они могут меняться для подгонки метрики, изменяя эффекты осветления и цветности соответственно.

Если они изменятся с единицы, то их значения должны быть включены в название системы, например, CIEDE2000(2:1:1).

Для субъективных тестов $k_L = k_C = k_H = 1$.