

СВЕТОДИОДНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МУЗЕЙНОГО ОСВЕЩЕНИЯ: ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ

А. Л. Закгейм

zakgeim@mail.ioffe.ru, Санкт-Петербург 194021, Политехническая ул. 26



Санкт-Петербург

2018 г.

Содержание



- 1. В чем различия между естественным и искусственным освещением: свечи, накаливаемые лампы, люминесцентные лампы, светодиоды....?**
- 2. Как с помощью светодиодов можно синтезировать естественный свет (и даже «лучше естественного света»)?**
- 3. Каковы перспективы (технические, экономические, эстетические и пр.) светодиодного музейного освещения?**

ФГБУН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И СУБМИКРОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (НТЦ микроэлектроники РАН)



(В 1991 г. выделен из Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе)



Санкт-Петербург,
Политехническая ул.26

Основное назначение : трансляция достижений фундаментальной науки в прикладные исследования и разработки

Основные научные направления: физика и технология полупроводниковых наногетероструктур, микроэлектронные и оптоэлектронные приборы на основе наногетероструктур

В последние годы особое место занимают исследования и разработки в области мощных светодиодных источников для различных применений: общее и специальное освещение, медицина, хирургия, агротехника и др.

Два вида света:

Естественный свет (солнечный, дневной, лунный) – был всегда.

2500–3500K Warm white

4000–4500K Natural white

5500–6000K Day white

7000–7500K Cool white

Главное:

- ✓ *Спектр широкий и сплошной;*
- ✓ *Спектр меняется в течение дня.*



К. Моне. Руанский собор при разном освещении: утро, полдень, вечер...

Художник пишет картину при **естественном** свете

Искусственное освещение (электрическое) – всего ~140 лет.



1879



1938



1960

~2000

Years

Главное:

- ✓ *Спектр статичен, без возможности управления во времени;*
- ✓ *Спектр часто селективный: нет полос, важных для правильного цветовосприятия.*



Зритель смотрит на картину при **искусственном** свете

Адекватно ли зрительское восприятие?

Некоторые исходные предположения по освещению картин:

- Лучшее восприятие живописи достигается, если освещающий картину свет совпадает по спектру (цвету) с тем, при котором художник ее рисовал (зритель будет видеть так, как видел художник).
- Для старых картин, да и большинства современных, это естественный свет, который бывает разным: утренний, полуденный, вечерний, солнечный, облачный и даже ночной - лунный.

А.И.Куинджи



Днепр утром



Березовая роща

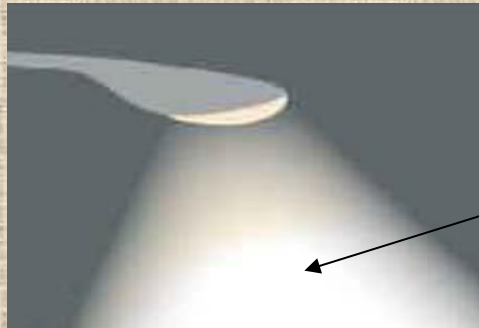


Ночь на Днестре

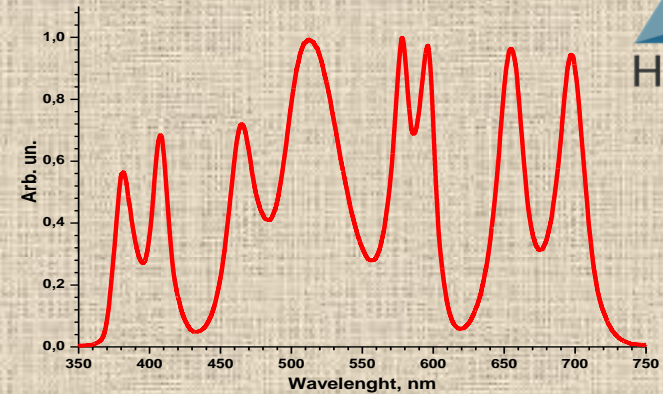
Вопрос: Возможна ли полная имитация естественного света искусственным?

Ответ: Да, в полихромных светодиодных источниках на принципах RGB-смешения. Современные RGB светодиоды возвращают искусственный свет к естественному

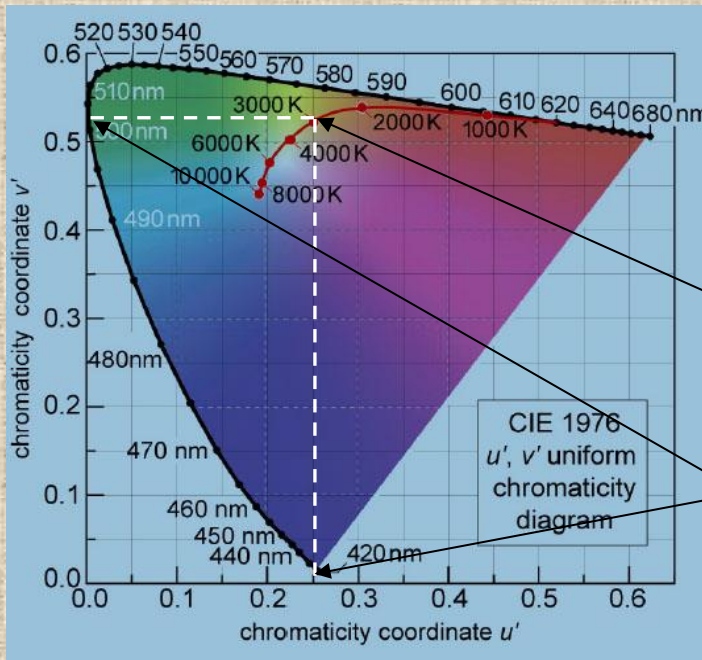
Качество света: основные показатели



Офис – 500 lx;
Операционная - 10000 lx

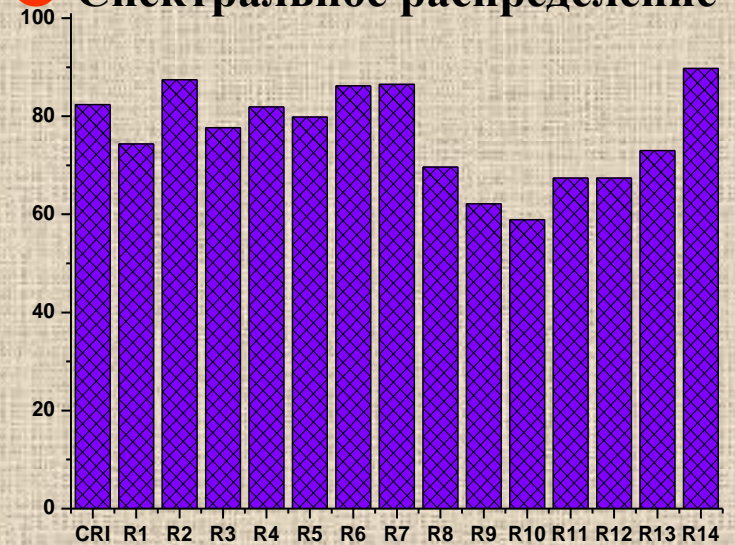


1 Освещенность [lx]



Коррелированная
цветовая
температура
(CCT);
Координаты
цветности (u', v')

2 Спектральное распределение



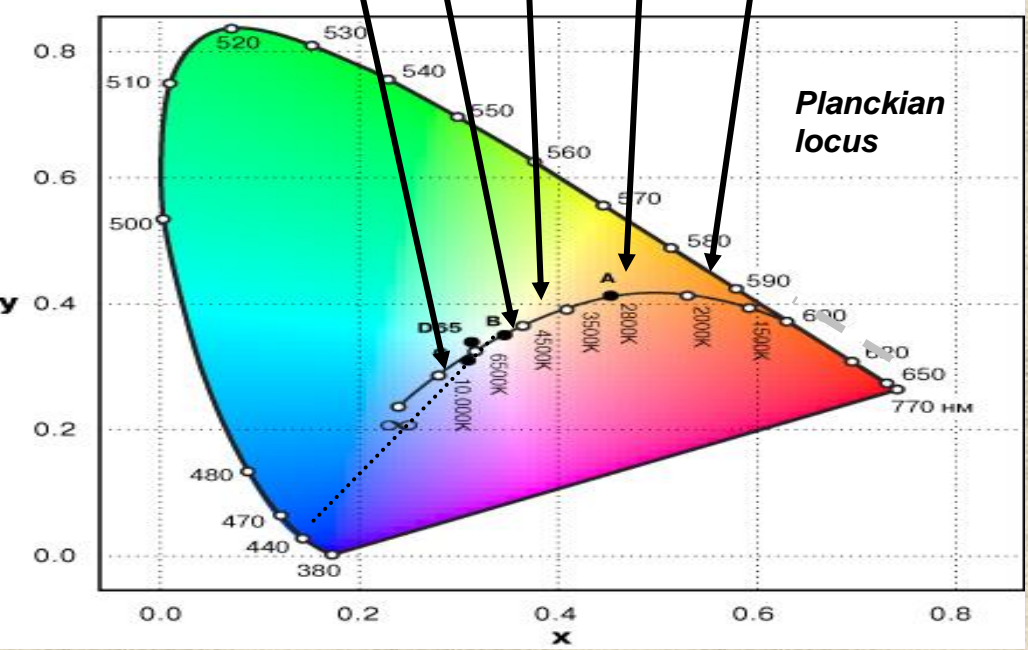
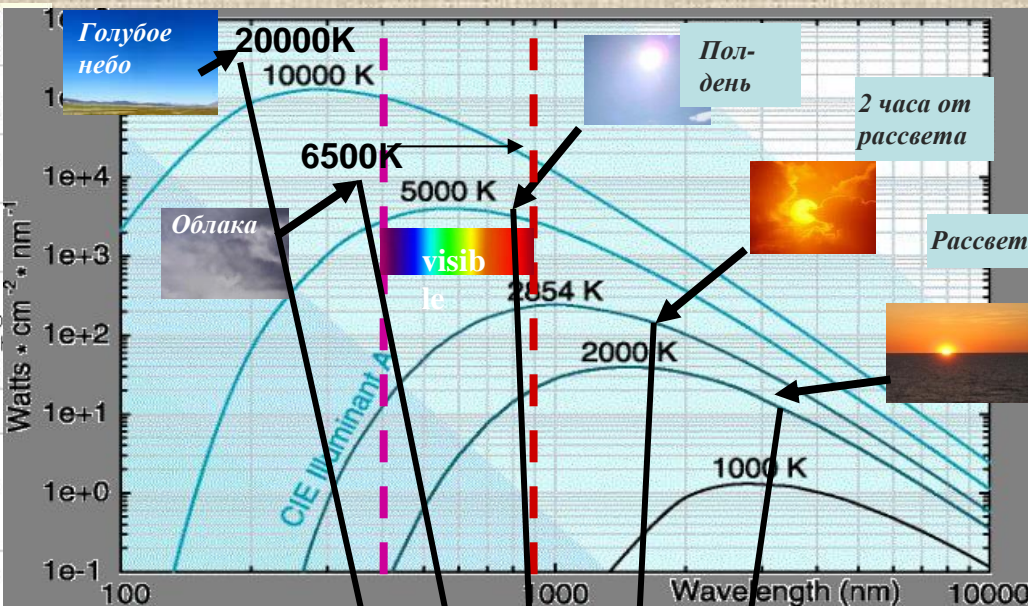
Общий R_a и специальные
индексы цветопередачи: R_{1-14} .

3 Цвет

5 Управляемость – возможность изменения (настройки) спектрально-цветовых параметров во время работы – «умный» (интеллектуальный) свет

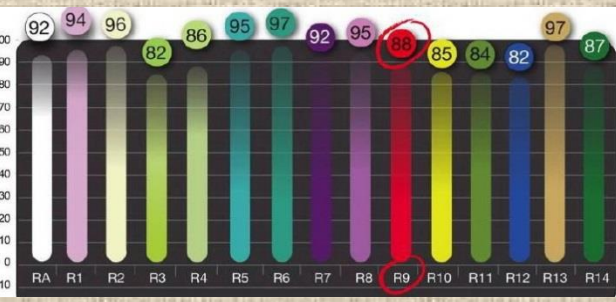
Естественный солнечный свет - идеал (эталон) в фотокolorиметрии

Голубое небо, тень	12000K 18000K
Дымка, тень	9000K 12000K
Пасмурно	6500K 7500K
Обычная летняя тень	6000K
Дневной свет, Фотовспышка	5500K (варьируется от 5400K до 5600K)
Голубая фотолампа	4900K
Солнечный свет - два часа после восхода или два часа перед закатом	3850K 4100K
Солнечный свет, час после восхода	3450K 3750K
Фотолампы накаливания, тип А	3400K
Фотолампы кварцевые, тип В	3200K
Восход и закат	3050K 3150K
Домашние галогенные лампы	2200K 3000K
Лампа 200Вт	3000K
Лампа 100Вт	2900K
Лампа 75Вт	2800K
Компактные люминесцентные лампы CFL	2700K
Свеча	1200K 1850K
Планы спички	1700K



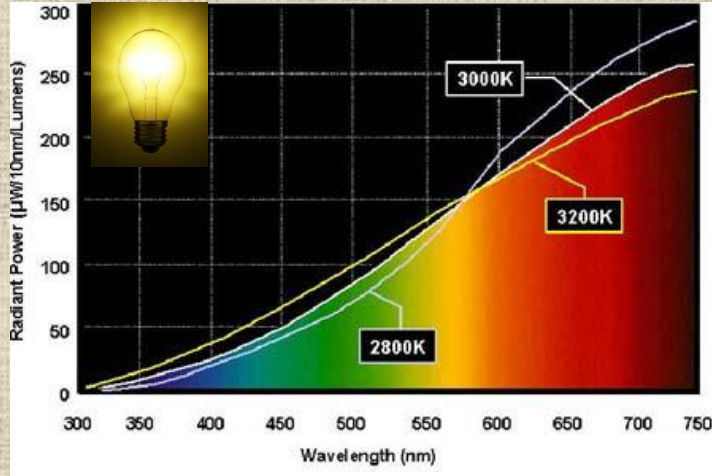
✓ Широкий сплошной спектр, близкий к АЧТ с $T_c = 1800-21000$ K;
 ✓ Суточные изменения интенсивности и спектрального состава (цвета): переход от теплых тонов (рассвет) к холодным (полдень) и снова к теплым (вечер).

✓ На цветовой диаграмме: Линия близкая к центральной области;
 ✓ Индекс цветопередачи 100 (по определению).



Какой свет дают традиционные искусственные источники?

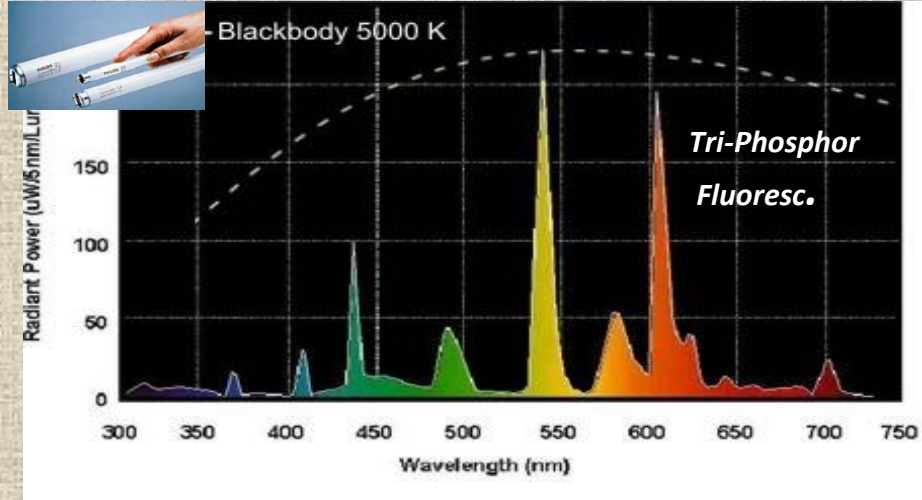
Лампы накаливания, галогенные лампы



- + ✓ Сплошной спектр, как у АЧТ;
- ✓ Индекс цветопередачи – 100
- ✓ Мало «синего» - спектр смещен в красную и ИК -области;
- ✓ Статичны;
- ✓ Большое потребление.

Используются для музейного освещения

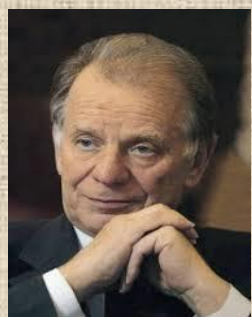
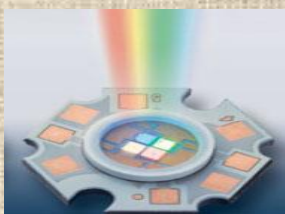
Люминесцентные ртутные лампы



- ✓ Селективный спектр;
- ✓ Статичны;
- ✓ Холодный белый свет $T_c \sim 5000 \text{ K}$;
- ✓ Низкий индекс цветопередачи ~ 70 ;
- ✓ Вредные полосы коротковолнового синего и УФ излучения

Не подходят для музейного освещения

Новая история: последние 15 лет - эпоха светодиодов



В становлении светодиодов (СД) – крупные достижения физики и техники - две Нобелевские премии:

Жорес Алферов, 2000 г.: основополагающие теоретико-экспериментальные работы по гетероструктурам - физической основе светодиодов (I-е поколение светодиодов на AlGaAs)



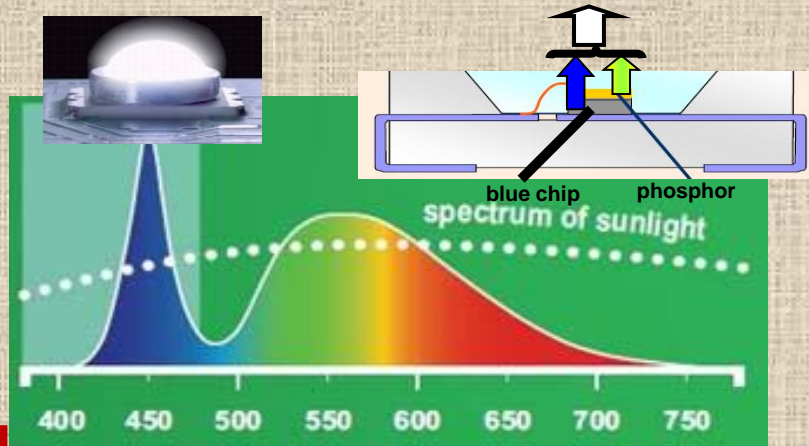
Shuji Nakamura, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano 2014 г.: за создание энергосберегающих источников света - синих светодиодов (III-е поколение светодиодов на AlInGaN)

Количественные преимущества СД: светоотдача в 5-10, а ресурс в 10-50 раз выше, чем у ламп. Нет УФ, нет ИК

Но для музейного освещения, прежде всего, важно качество света!

С точки зрения качества света: два вида СД

Белые люминофорные СД

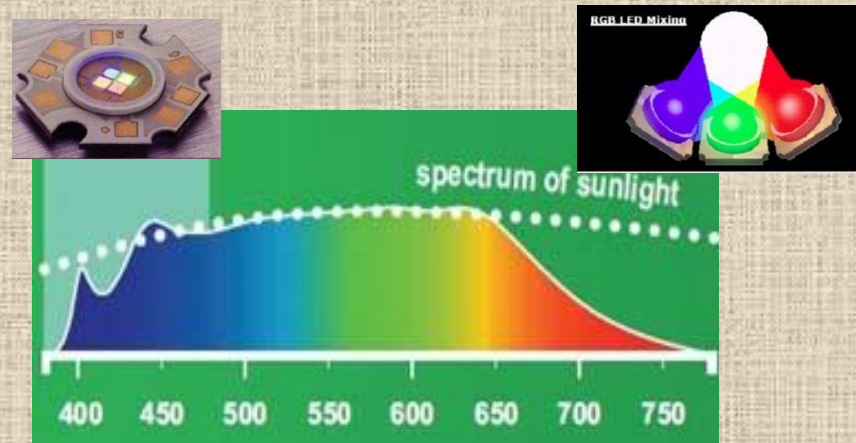


- ✓ Отработаны, массово выпускаются;
- ✓ Высокая светоотдача;
- ✓ Неплохие характеристики по цветовым температурам и индексу цветопередачи.

- ✓ Не перестраиваемые по спектрально-цветовым характеристикам;
- ✓ «Наследники» люминесцентных ламп.

В последние годы быстро внедряются в музейное освещение (Лувр, Прадо, Рейксмузеум и др.)

Полихромные СД матрицы (RGB)

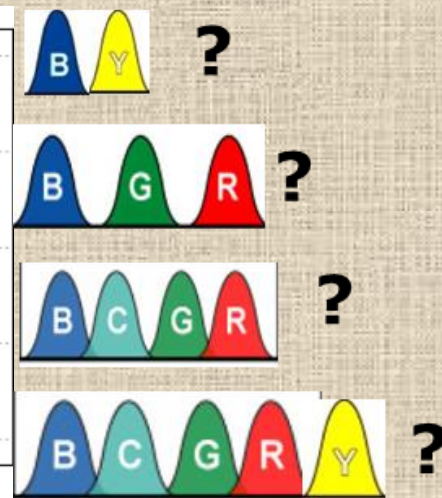
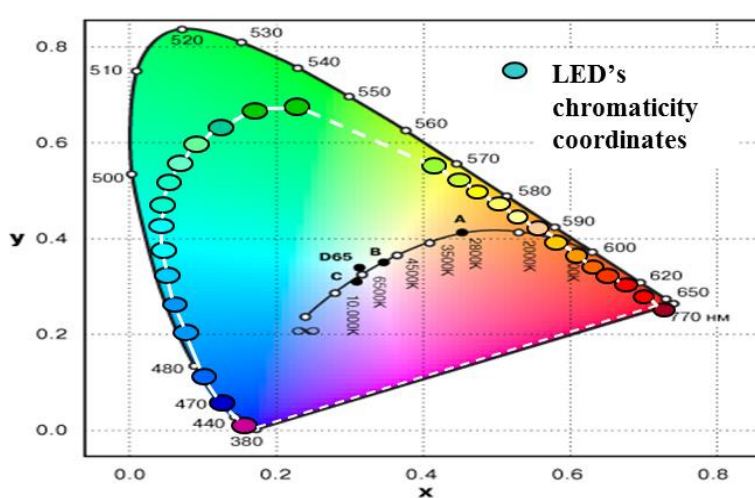
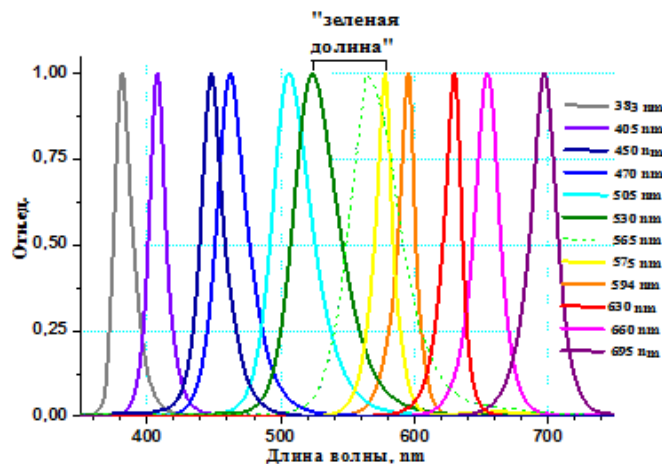


- ✓ Принципиально достижимы высокие индексы цветопередачи и любые цветовые температуры – возвращение к естественному свету;
- ✓ Уникальная возможность динамически управлять спектром, цветом и другими параметрами – «умный» свет.

Сравнительная сложность излучателя, блока управления, ПО.

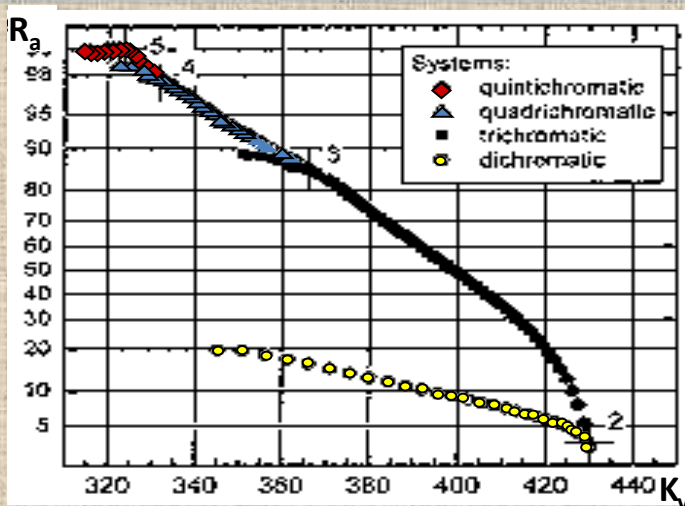
Пока не получили распространения в музейном освещении ...

RGB: сколько и какие СД нужны для синтеза хорошего белого?



За последние 10 лет - более 20 теоретических и экспериментальных работ по цветосмещению (A.Zukauskas, M.Shur, E.Schubert, Y.Ohno, С.Карпов, К.Булашевич, А.Закгейм и др.)

Критерии многопараметрической оптимизации → достижение максимума световой отдачи, общего и частных индексов цветопередачи R_a , R_i , заданных T_c

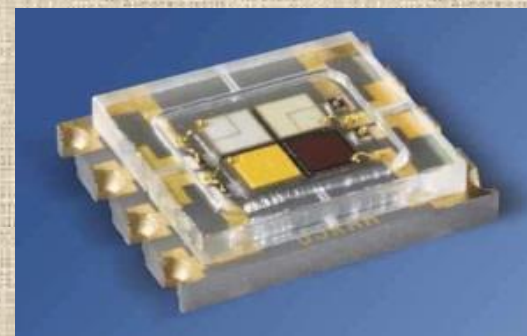
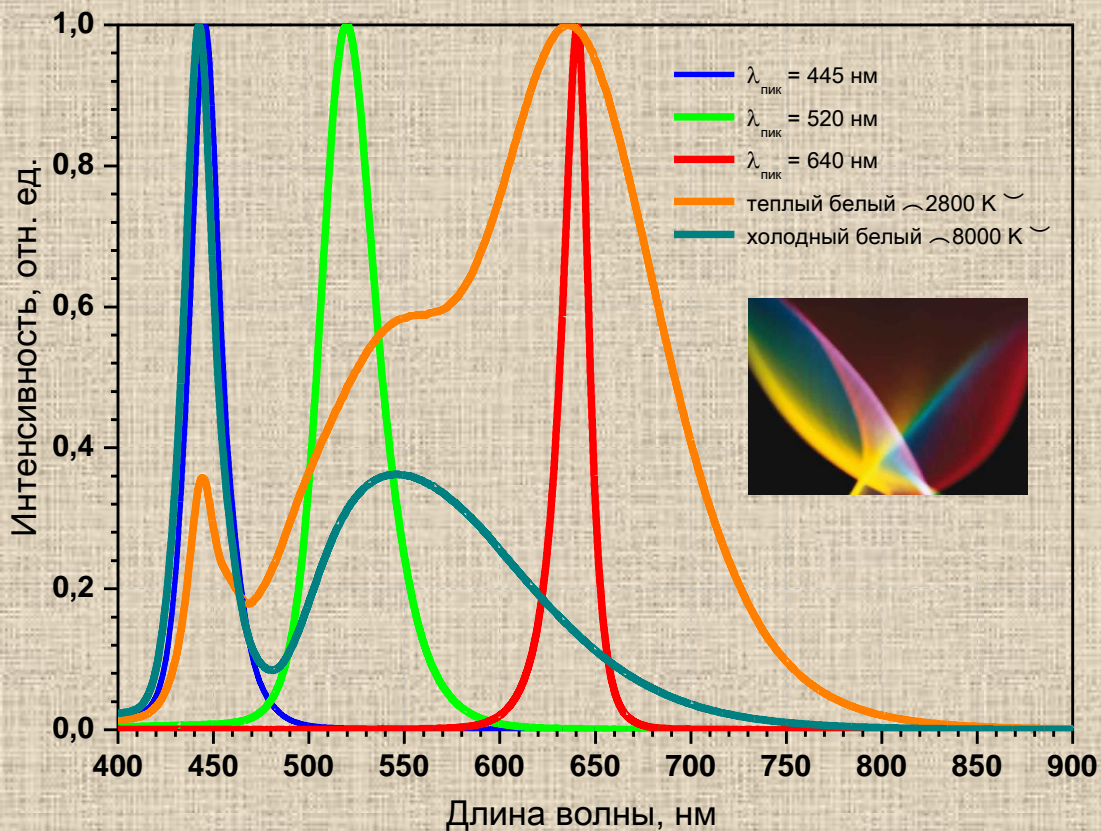


Существует фундаментальный компромисс между световой отдачей K_v и индексом цветопередачи R_a : одна из двух величин может быть поднята (↑) только за счет снижения другой (↓);

Для музейного освещения важнее качество света R_a , чем экономия K_v

По результатам компьютерного моделирования:

$$S(\lambda) = \sum_{i=1}^5 S(\lambda_i) \left\{ \begin{array}{l} 1 - 460/22 \text{ nm}^* (\text{AlInGaN}); \\ 2 - 520/34 \text{ nm}^* (\text{AlInGaN}); \\ 3 - 630/15 \text{ nm}^* (\text{AlInGaP}); \\ 4 - T_u = 2800 \text{ K} (\text{люминофорный}); \\ 5 - T_u = 8000 \text{ K} (\text{люминофорный}) \end{array} \right.$$



LE RTDUW S2W (OSRAM)

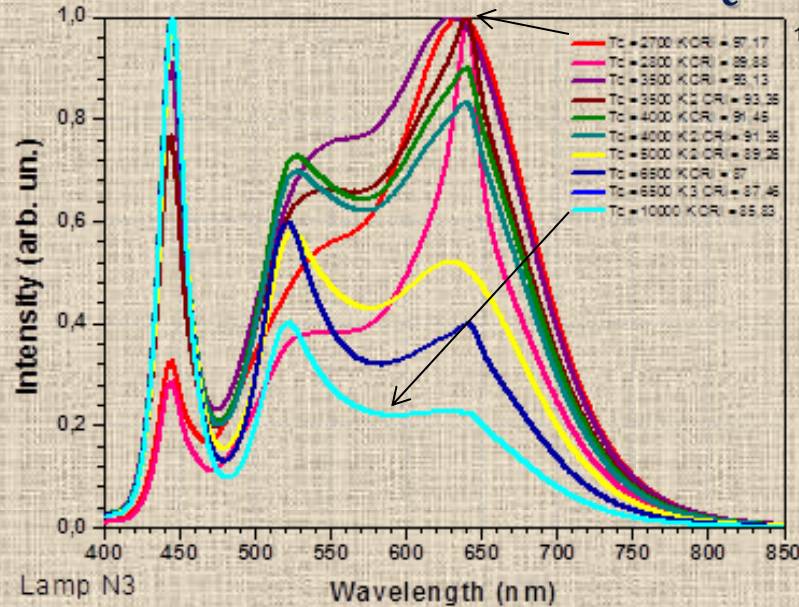


LE CWUW S2W (OSRAM)

*Через дробную черту указаны значения λ_{peak} и $\Delta\lambda_{0.5}$.

Синтез белого света в диапазоне цветовых температур

$T_c = 2800-10000$ К.



Спектры излучения при различных T_c *

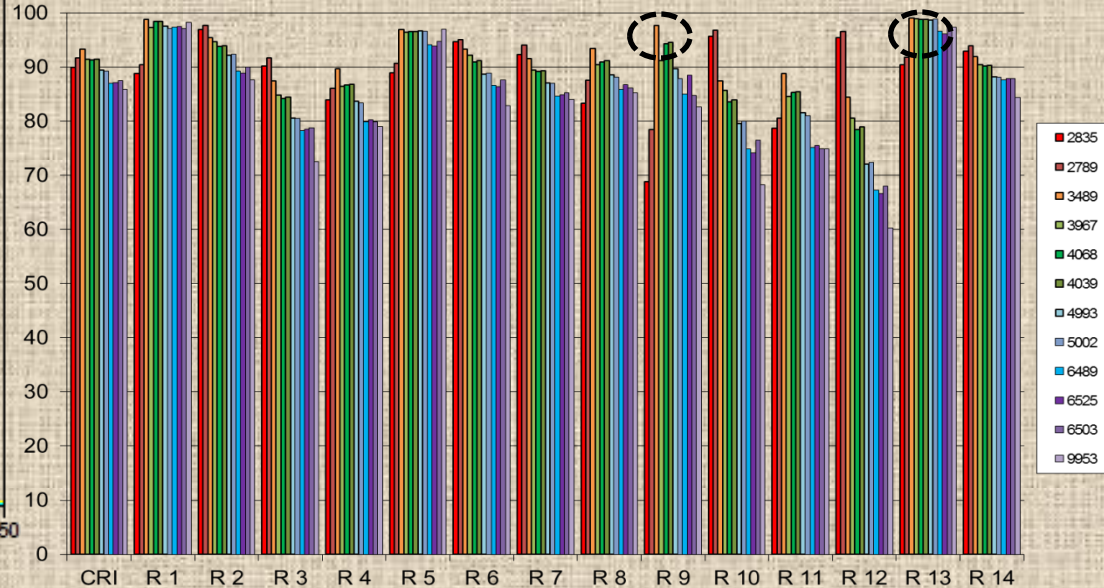


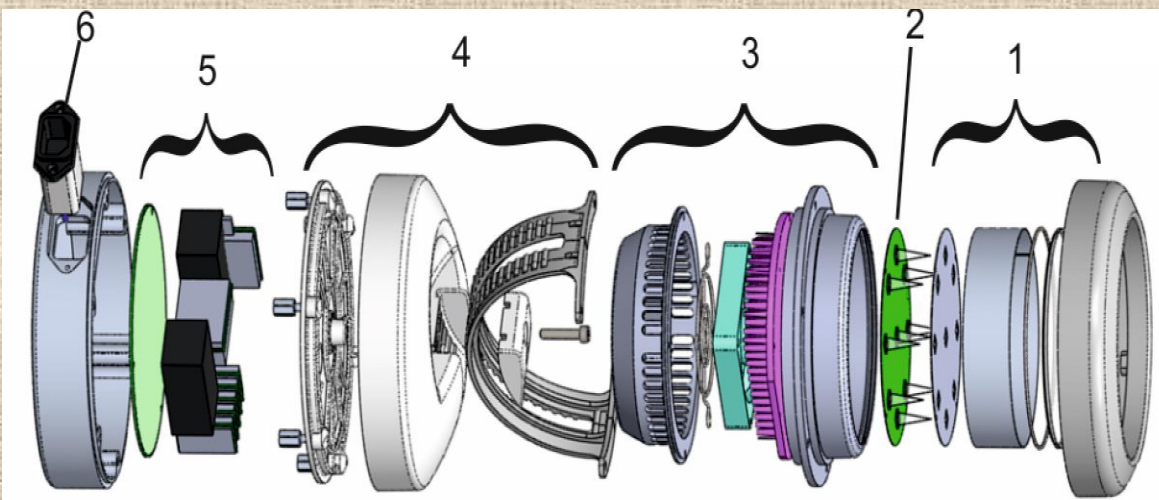
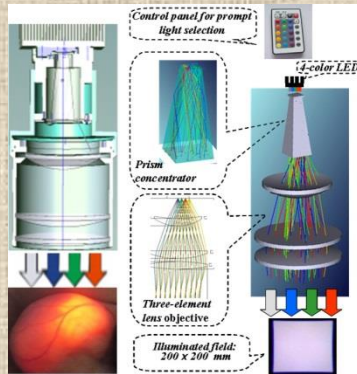
Диаграмма индексов при различных T_c

В области тепло-нейтрального белого света $T_c=2800-5000$ К реализуются значения $R_a \geq 90$, а все частные индексы $R_i \geq 80$. Ряд индексов R_1, R_5, R_{13} приближается к 100. Особенно важно высокое значение индексов $R_9, R_{13} \sim 95-98$ (биологические ткани).

В области очень холодного белого света $T_c=6500-10000$ К, редко используемого при освещении, наблюдается снижение R_a до 85-87, а отдельных частных индексов R_{10}, R_{12} до 60-65.

* Для всех T_c основной вклад в общий световой поток вносят люминофорные СД. Монохроматические СД синего, зеленого и красного цвета играют корректирующую роль для «вытягивания» частных индексов цветопередачи R_i

НТЦ микроэлектроники РАН: ряд разработок динамически управляемых источников различного назначения: общее и специальное освещение, хирургия, агротехника, декоративная подсветка и др.



1 - оптическая система, 2 – светодиодный (СД) модуль, 3 – радиатор с пьезо-вентилятором, 4 - основание корпуса с поворотным механизмом, 5 – электронный блок питания и управления, 6 – сетевой фильтр

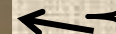
Сегодняшние тенденции → создание светодиодных систем освещения с высоким качеством света, регулируемых по цвету и яркости, дистанционно управляемых (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и др.), дешевых и простых в эксплуатации... Philips, Osram, Cree...

Наша последняя разработка: Светодиодная динамически управляемая система освещения (СДУСО) – 2014-16 г.г.*

$T_c = 2800 \text{ K}$



$T_c = 4500 \text{ K}$

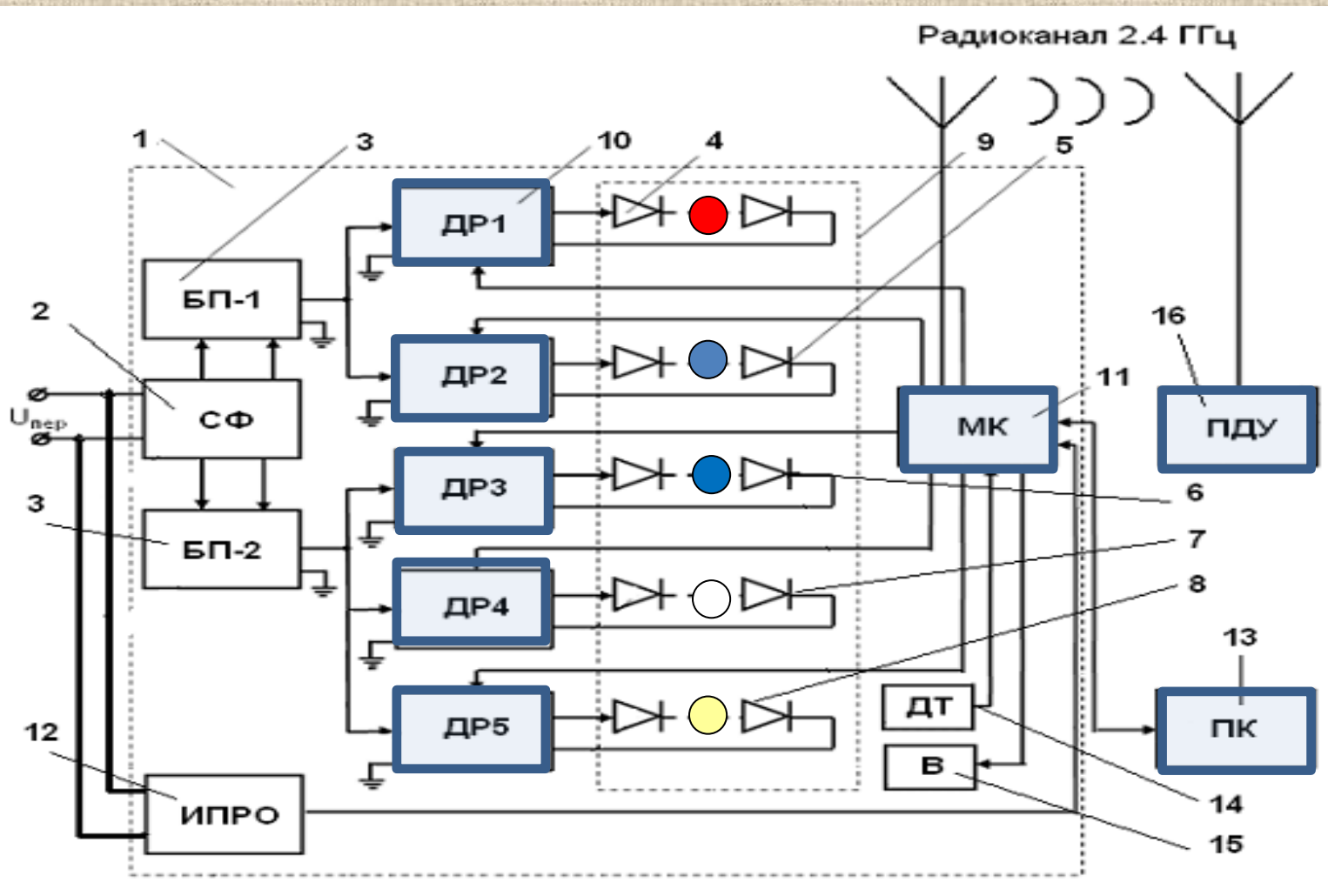


Общие данные:

1. Система **СДУСО** объединяет до 30 отдельных источников (ИС).
2. Управление параметрами излучения по радиоканалу от пульта дистанционного управления (ПДУ) или персонального компьютера (ПК). Радиус действия до 35 м.
3. Три режима работы:
 - «Выключено» - сеть 220 В отключена;
 - «Дежурный режим (спящий)» - 220 В включено, свет выключен (<0,5Вт);
 - «Рабочий режим» - обеспечение заданных требований к цветовым (колориметрическим) и световым (фотометрическим) характеристикам (<40Вт).

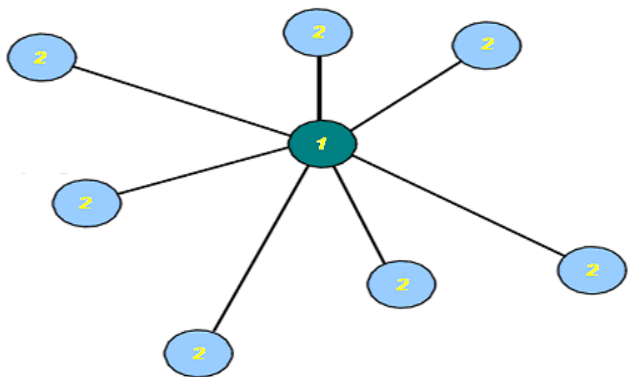
*Совместно с ФТИ им. А.Ф.Иоффе и ОАО "ИНТЕР РАО Светодиодные системы", ОАО "Светлана-ЛЕД"

Функциональная электрическая схема



1- корпус, 2-сетевой фильтр, 3-преобразователи (AC-DC), образующие блок питания, 4... 8 пять цветных групп излучателей R, G, B, $W_{(cold)}$ и $W_{(warm)}$, подключенные к пяти драйверам ДР1...ДР5(10), 11- управляющий микроконтроллер, 12 – источник режима ожидания, 13 –ПК, 14 –датчик температуры, 15 - вентилятор, 16 - ПДУ

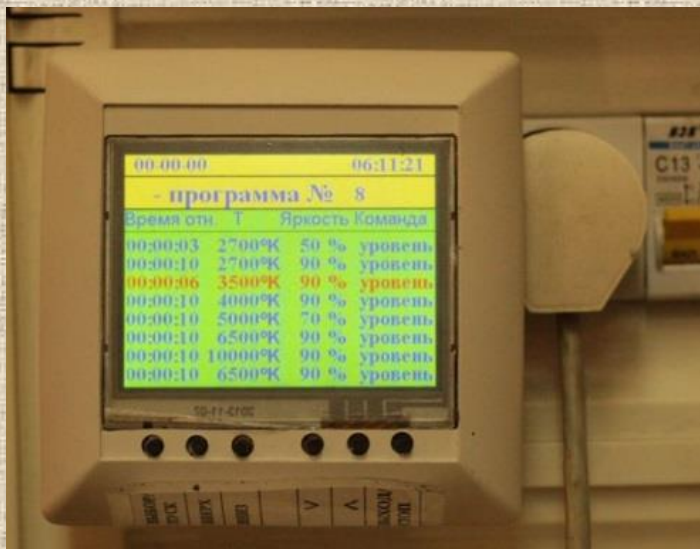
Беспроводная сеть и ее программное обеспечение



1 – координатор сети, 2 – оконечные устройства

- Модель передачи данных определяется топологией сети – «звезда». Координатором сети может быть компьютер либо ПДУ;
- Главные требования: минимальное потребление при обеспечении мониторинга и управления свето- и колориметрическими параметрами освещения;
- Сеть основана на стандарте IEEE 802.15.4 и его программной надстройке ZigBee (*помехозащищенная, совместимая с Wi-Fi, Bluetooth*)

Пульт дистанционного управления (ПДУ)



ПДУ - блок, который вставляют в розетку сети электропитания, с цветным TFT-индикатором.

ПДУ обеспечивает

- ✓ хранение режимов работы СДУСО;
- ✓ выбор программы и времени работы СДУСО;
- ✓ управление на расстоянии до 35 м со скоростью до 2,0 Мбит/с, число каналов 16

Основные технические характеристики:

- Световой поток от единичного ИС не менее 3000 лм (*эквивалентн ~40 ваттной ртутной люминесцентной лампе*)
- Ослабление (dimming) с шагом 10 % от максимального значения;
- Угол излучения по уровню 0,5, не менее 120°;
- Диапазон цветовых температур $T_c = 2800-10000$ К;
- Дискретность выбора цветовых температур 200 К;
- Общий индекс цветопередачи R_a , не менее 85, Специальные индексы цветопередачи R_{1-14} , не менее 70 во всем диапазоне T_c

Универсальность применения:

- Имитация внутри помещений, лишённых окон, освещения, отвечающего естественному дневному циклу (биологическим циркадным ритмам);
- Создание специальных условий освещения для персонала, работающего при больших психофизических нагрузках и способствующие либо концентрации внимания, либо быстрой релаксации;
- Настраиваемое хирургическое освещение для контрастной визуализации биологических тканей;
- Музейное освещение с обеспечением наилучшего воспроизведения живописи

Примеры освещения*

*Естественный
дневной свет*



*RGBA-СД-лампа
 $T_c=4100\text{K}$ (оптимум)*



*Лампа
накаливания
 $T_c=2800\text{K}$*



Лучше всего



Хорошо



**Плохо (нет
синих красок)**

** Иногда оправдано специальное акцентное освещение (например, без зелено-желтой составляющей с плохим индексом цветопередачи) для контрастного освещения, повышения яркости отдельных объектов в сине-красных тонах*



Шедевры живописи в «новом» свете

(Лувр, Лондонская национальная галерея, Амстердамский Рейксмузеум, Сикстинская капелла, Дрезденская галерея и др. внедряют светодиодное освещение



Рукопожатие на фоне «Ночного дозора» генерального директора концерна Philips - Frans van Houten и директора амстердамского Rijksmuseum - Wim Pijbes

- Пока речь идет о хорошем (теплый свет $T_{\text{ц}} \sim 3000 \text{ K}$, максимальные индексы цветопередачи $R_i \sim 90$), но статичном освещении люминофорными светодиодами.
- Перспективы индивидуального освещения динамически управляемыми светодиодными источниками с выбором цветовой температуры - на стадии обсуждения.

Мы предлагаем для музейного освещения:

➤ **Опытные образцы (малые серии) светодиодных осветителей для индивидуальной подсветки картин с настраиваемыми спектрально-цветовыми характеристиками, имитирующими естественное освещение в различных условиях;**

➤ **Проведение совместных исследований с экспертами искусствоведов:**

при варьировании светодиодного освещения по заданному алгоритму опытным путем определять параметры освещения, отвечающие лучшему восприятию цветовой гаммы данной картины;

➤ **Для постоянного освещения картины перестраиваемый источник фиксируется на определенных при экспертизе оптимальных параметрах: коррелированная цветовая температура, яркость.**

Спасибо за внимание!