

Исследование воздействия оптического излучения на материалы музейных экспонатов и требования к измерительным приборам

С.С. БАЕВ¹, В.Н. КУЗЬМИН², К.А. ТОМСКИЙ^{2,3}

¹ ФГОУ ИТМО, СПб.

² ООО Научно-техническое предприятие «ТКА», СПб

³ E-mail: tka46@mail.ru

Аннотация

Светодиодное освещение создаёт новые возможности для наилучшего представления музейных экспонатов и создания дополнительных эффектов восприятия света. При этом появляется возможность использования результатов объективных световых и цветовых измерений при регулировании количества и качества освещения. Фотометрические приборы могут стать постоянными помощниками при оформлении экспозиций, выставок и музейных помещений. Ещё более важное значение имеют фотометры для контроля допустимого уровня освещённости и УФ-облучённости. При верной оценке повреждающего воздействия светодиодного освещения появляется возможность существенно увеличить разрешённый уровень освещения экспонатов, что является постоянным требованием дизайнеров. Рекомендации по нормированию освещения основываются на результатах специальных исследований, которые проводятся с учётом групп материалов по светостойкости и свойств источников света. Такие исследования были сделаны по заказу Министерства культуры силами ООО НТП «ТКА» и ГосНИИРеставрации. В статье приведены основные результаты этой работы, главной целью которой было установление безопасного допустимого уровня УФ-облучённости материалов при использовании энергосберегающих люминесцентных ламп, а также основные характеристики выпускаемых фотометров. Аналогичные исследования и разработку рекомендаций необходимо провести и применительно к светодиодным источникам света.

Ключевые слова: освещённость, УФ-облучённость, длина волны, спектральное распределение, светостойкость, допустимый уровень.

1. Введение

В процессе создания измерителей оптического излучения для музеев выявилась необходимость проведения дополнительных исследований для установления наряду с известными данными о видимом излучении ещё и предельных уровней ультрафиолетовой облучённости.

Известно, что длительное воздействие излучения на объекты приводит к заметным для глаза изменениям их внешнего вида (цвета, яркости, механических свойств и структуры материала). В первой большой научной публикации о воздействии видимого излучения на выцветание акварельных красок было установлено, что эффект выцветания зависит от уровня облучённости и времени экспонирования [1]. Были установлены первые качественные зависимости для процессов изменения и разрушения объектов [2].

Более поздние исследовательские и практические работы позволили установить простые рекомендации для музейных экспозиций: ограничить максимальную допустимую освещённость для большинства свето-

чувствительных объектов величиной 50 лк и величиной 200 лк для картин маслом и темперой. На этом подходе базировались системы освещения музеев, освещение в которых создаётся естественным светом или лампами накаливания.

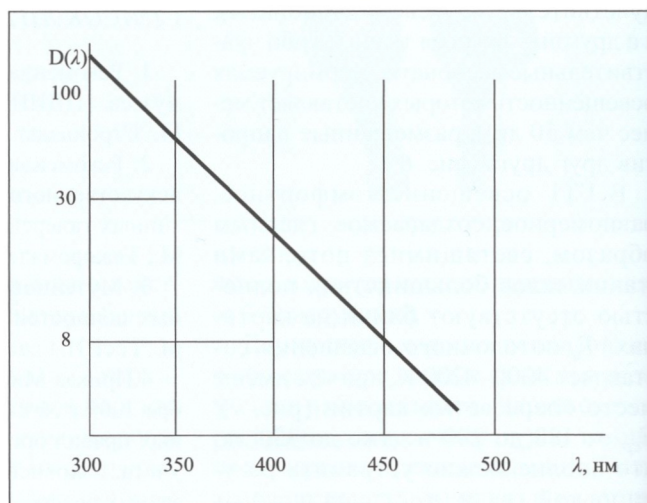
Большинство принятых в разных странах рекомендаций по освещению музейных помещений строились на значении освещённости в люксах и на отношении потока УФ излучения источника света в микроваттах к его световому потоку в люменах. Такое допущение было корректным для тепловых источников света (в основном, ламп накаливания) и стало ошибочным при появлении новых источников, у которых доля ультрафиолетового излучения существенно меняется, и для её определения требуются прямые измерения ультрафиолетового излучения.

В работе профессора Крохмана [3] рассматриваются типичные музейные материалы, подвергаемые воздействию излучения различных источников света. На основании этих экспериментов сделана попытка установить количественные нормы по изменению цвета экспоната после облучения с учётом относительного коэффициента повреждения $D(\lambda)$ (рис. 1).

Было установлено, что влияние оптического излучения на музейные экспонаты зависит от:

- пространственного распределения потока излучения;
- спектрального состава излучения;
- относительной спектральной чувствительности образца, т.е. степени его устойчивости к воздействию излучения;

Рис. 1. Степень вредного воздействия излучения в зависимости от длины волны ($D(\lambda) = 100\%$ при $\lambda = 300$ нм)



– продолжительности облучения. Действующие рекомендации МКО по контролю освещения в музеях выпущены в 2004 г. [4] и нуждаются в существенной актуализации в связи распространением в музеях светодиодных источников света.

2. Методы проведения исследования

Идея экспериментального определения предельно допустимых значений УФ излучения заключается в наглядном определении и представлении в виде графиков процесса изменения оптических свойств поверхности испытываемого материала под воздействием УФ излучения до заранее заданных значений, определённых в соответствии с выбранными критериями [5].

Методика определения изменения свойств материалов музейных и библиотечных фондов под воздействием УФ излучения состоит из самостоятельных методов:

– метод создания необходимого уровня облучённости с постоянным контролем значений экспозиции, при которых происходит изменение физико-химических и/или физико-механических свойств (в дальнейшем, изменение свойств);

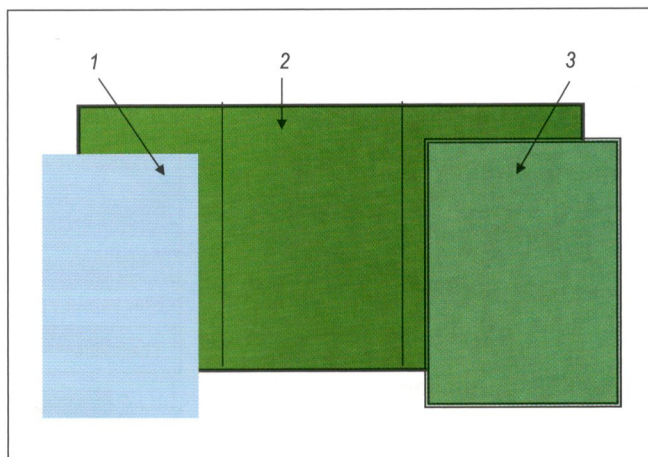
– метод измерения и контроля достигнутого изменения свойств материала;

– метод и порядок облучения конкретных выбранных для облучения образцов музейных и библиотечных материалов;

– обработка результатов испытаний контрольных и рабочих образцов.

Вследствие индивидуальной чувствительности к воздействию оптического излучения каждого из материалов для эксперимента было подготовлено максимально возможное количество образцов самых разнообразных материалов. Были отобраны и сгруппированы на 12 планшетах 83 образца различных материалов с предположительно высокой и средней чувствительностью к облучению, которые подвергались облучению в различных режимах источниками различной мощности и различного спектрального состава. Каждый образец был разделён на 3 участка (рис. 2) с примерно одинаковыми свойствами поверхности, первый из которых (контрольный) был закрыт светонепроницаемым экраном, а третий подвергался облучению только видимым светом через защитную плёнку, отсекающую УФ часть спектра излучения.

Рис. 2. Схема подготовки образца к облучению:
1 – участок, закрытый светонепроницаемым экраном; 2 – открытый участок; 3 – участок, закрытый УФ фильтром



Второй участок каждого образца подвергался прямому облучению непосредственно источником УФ-излучения. Интенсивность облучения на объекте ежедневно контролировалась фотометром как в видимом, так и в УФ диапазонах, а экспозиция в Вт·ч/м² фиксировалась нарастающим итогом через каждые 8–9 часов ежедневного облучения. После каждого ежедневного облучения производились измерения оптических свойств поверхностей образцов. Измерения оптических свойств образцов производились (для уменьшения погрешности за счёт неоднородности их поверхности) в 3–6 точках каждого участка с усреднением результатов в пределах каждого участка, при освещении образцов специальной светоизмерительной лампой с высокостабильным спектром излучения и цветовой температурой $T_{ц} = 2856$ К.

Измерялся коэффициент яркости каждого из участков образца и координаты цвета R , G , B , определяемые с помощью яркомера ФПЧ с цветоделительными фильтрами из стёкол KC13, 3C11, CC5, рекомендованных для трехцветной проекции каталогом цветных стёкол. Абсолютные значения координат цвета для разных типов материалов могут отличаться более чем на порядок и сильно зависят от условий измерения, поэтому для уменьшения погрешностей они не использовались. Более правильным является сравнение характеристик облучённых и необлучённых участков, т.е. определение изменения яркости и координат цветности участков, облучаемых УФ излучением, относительно контрольных. Поэтому для дальнейшей обработки результатов измерений вычислялись относительные значения изменений яркости и координат цветности участков, облучаемых УФ видимым излучением, в процентах относительно контрольного участка для каждого ежедневного облучения.

Результаты измерений за достаточно длительное время (пока последствия облучения не станут хорошо заметными невооружённым глазом) сводились в таблицу, в соответствии с которой строились графики зависимости относительного изменения яркости¹ и цвета от полученной каждым образцом нарастающей во времени дозы УФ излучения, т.е. наглядно изображалось развитие во времени процесса изменения оптических свойств поверхности под воздействием облучения.

Для наглядного представления и проведения анализа происходящих изменений результаты обрабатывались с использованием специально разработанных программ на основе *Microsoft Excel*.

3. Результаты проведённых исследований

В основу выбора критерия допустимого значения изменения яркости был положен закон Вебера-Фехнера [6], согласно которому относительное значение пороговой величины

¹ Яркость измерялась фотометром фотоэлектрическим переносным ФПЧ производства ЗОМЗ, г. Сергиев Посад (основная приведённая погрешность фотометра при измерении яркости составляет не более чем ± 10 %).

Допустимый уровень УФ экспозиции музейных материалов

| Группа материалов по светостойкости | Допустимая УФ экспозиция, Вт·ч/м ² |
|-------------------------------------|---|
| Газеты | 68 |
| Бумага | 150 |
| Акварель | 1250 |
| Масляная краска | 1680 |
| Текстиль | 620 |

«заметности» изменения яркости объекта глазом не зависит от её абсолютной величины и составляет около 2 %. Пороговое значение «заметности» изменения цвета зависит, во-первых, от индивидуальных особенностей восприятия цвета каждым субъектом (различная спектральная чувствительность), и, во-вторых, от освещённости, цветового тона и цветовой насыщенности объекта. По результатам эксперимента порог заметности изменения цвета составил от 4–5 % для хорошо освещённых насыщенных цветов и до 20–30 % для малонасыщенных и тёмных (коричневый, фиолетовый, тёмно-синий, тёмно-зелёный) цветов.

Исходя из установленных критериев максимально допустимых изменений яркости ($\pm 2\%$) и цвета ($\pm 5\%$), по графикам изменения оптических свойств поверхности для каждого образца определялась максимально допустимая доза УФ излучения, при которой достигались критические значения заметности изменения яркости и цвета образцов (рис. 3, на примере акварели).

Максимально допустимые дозы УФ излучений для групп материалов (например, для акварели, независимо от цвета) определялись посредством выбора наименьшего значения максимально допустимых доз из полученных для всех образцов, входящих в данную группу материалов (табл. 1). Таким образом, это значение будет гарантированно безопасным для всех остальных материалов, входящих в группу.

В качестве рекомендуемых норм для максимально допустимых доз УФ излучения были приняты полученные максимально допустимые дозы с учётом пересчётных коэффициентов, учитывающих интегральное пропускание защитной плёнки на участках, облучаемых светом, и спектральную чувствительность радиометра при измерении УФ-излучения.

Пересчётный коэффициент для видимого излучения определялся экспериментально. Люксметром измерялась освещённость от одного и того же источника в одной и той же точке без плёнки и с плёнкой. Коэффициент пропускания света плёнкой составил 0,22, на столько же ослабляется свет, прошедший через плёнку и попадающий на испытываемые образцы. Следовательно, этот же коэффициент сле-

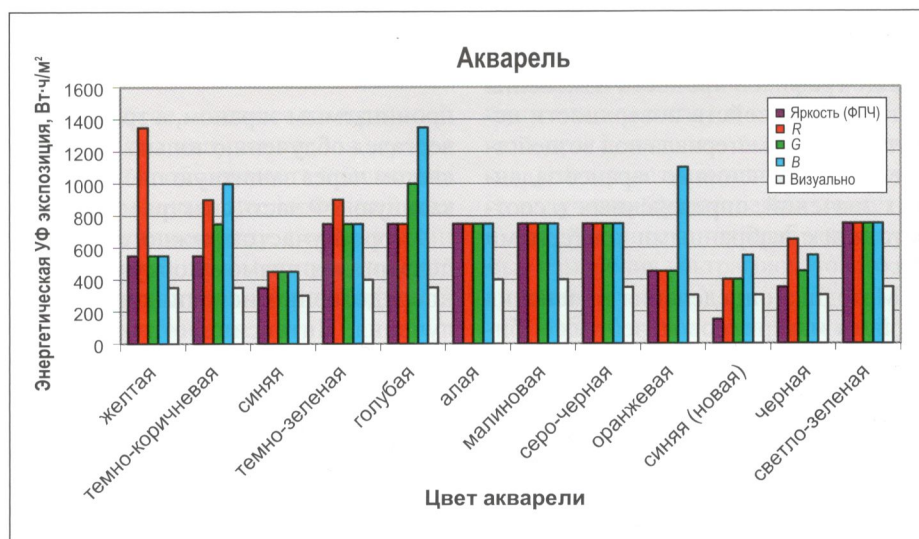


Рис. 3. Значения энергетической УФ экспозиции, приводящие к пороговым изменениям яркости (более чем 2 %) и координат цвета (более чем 5–20 %) (для акварели)

дует ввести в качестве поправки при определении истинного значения освещённости на образцах.

Пересчётный коэффициент для УФ-излучения был определён расчётным путём по типовой характеристике спектрального распределения излучения облучающей ртутной лампы высокого давления ДРШ-250 и спектральной характеристике чувствительности радиометра. Он составил величину 1,14. Этот же коэффициент следует ввести в качестве поправки при определении истинного значения облучённости на образцах.

В качестве норм для каждого типа материалов были установлены максимально допустимые дозы и интенсивности для постоянных экспозиций, для временных экспозиций и для длительного хранения и особо ценных экспонатов (табл. 2).

В качестве рекомендуемых норм минимальных допустимых значений облучённости/освещённости были приняты:

– для УФ излучения – практически достижимый минимум;

– для видимого излучения – нормы [7], обеспечивающие безопасный и аварийный проход по музейным помещениям, а также минимальные уровни освещённости, необходимые для комфортного рассматривания экспонатов.

Иллюстрация некоторых результатов исследований представлена на рис. 4.

4. Фотометрические приборы для музеев

Продолжением выполненной работы стало создание группы фотометров, обеспечивающих измерения характеристик световой среды в музеях. В музейной практике наиболее востребованными являются измерения:

- освещённости;
- УФ облучённости;
- цветовых характеристик (цветовой температуры, индекса цветопередачи, координат цветности);
- яркости (в т.ч., распределения яркости в поле зрения наблюдателя);
- блёскости.



The research of influence of ultraviolet radiation on exhibits

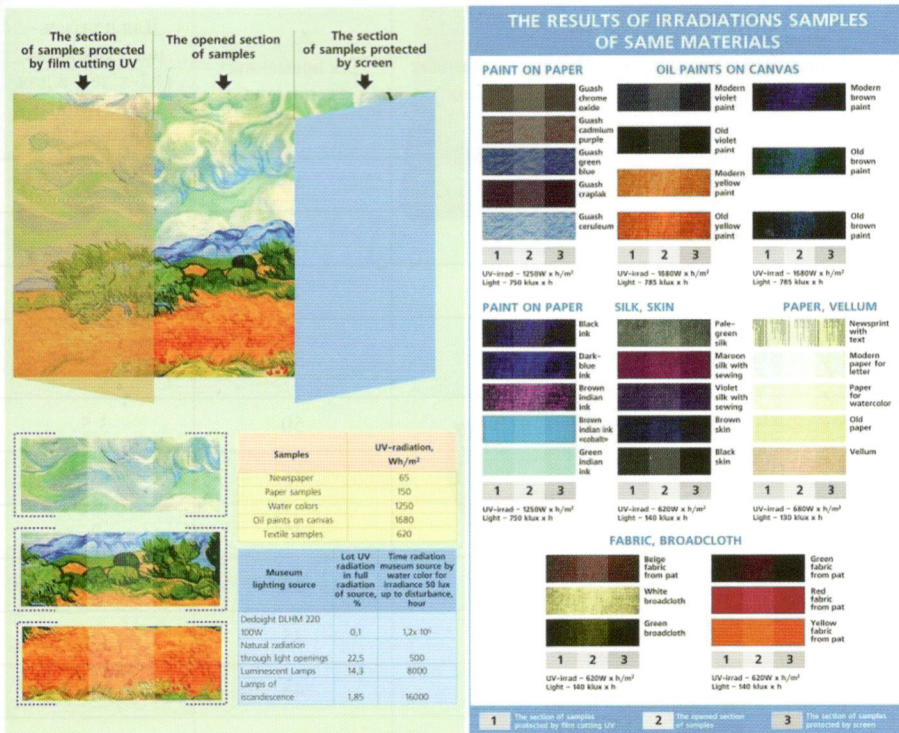


Рис. 4. Визуальные изменения в различных материалах

4.1. Измерение освещённости

Традиционно, наиболее распространённым прибором является надёжный и простой измеритель освещённости – люксметр. Существенные изменения в метрологии фотометров прошли во второй половине прошлого века. В [8] было показано, что использование распространённых люксметров на основе селеновых фотоэлементов и аналогичных по типу приборов приводит к существенной (более чем 20 %) погрешности при измерении люминесцентных источников света. В соответствии с рекомендациями МКО [9], измерители освещённости должны быть с высокой точностью скорректированными под относительную спектральную световую эффективность излучения $V(\lambda)$. ВНИИОФИ разработал соответствующие требования к средствам оптического измерения, и первым фотометром нового поколения, прошедшим государственную регистрацию, стал комбинированный прибор ТКА-01/3 (рис. 5) разработанный специально для музеев и библиотек.

В зависимости от экспонируемых материалов, уровень музейного освещения, как правило, находится в диапазоне от 30 до 700 лк. Однако целесообразно использовать один прибор как для измерения (контроля) освещённости в залах, в коридорах и на лестницах, где освещённость может снижаться до 5 лк, так и вне помещений, где освещённость может достигать 100000 лк и более.

Соответственно, диапазон измерений музейного люксметра должен находиться в пределах 1–200000 лк. Предел допускаемой относительной погрешности измерений не должен превышать 8 %. Таким требованиям удовлетворяет большинство выпускаемых люксметров: *Hagner* (Швеция), *Minolta* (Япония), *TKA* (Россия), *Testo* и *Krohmann* (Германия), *Kara Tekniikka Oy* (Финляндия) и другие.

4.2. Измерение УФ облучённости

Ещё более важное значение для сохранности музейных экспонатов имеет контроль за уровнем УФ облучён-

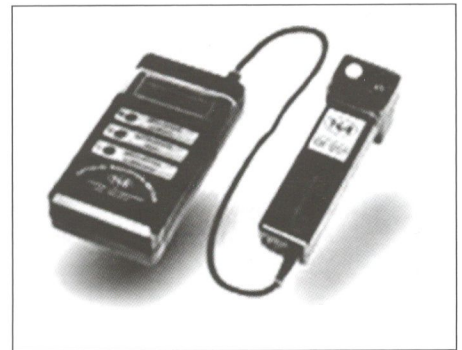


Рис. 5. Комбинированный прибор ТКА-01/3

ности. Разработка УФ-радиометров стала особенно сложной в метрологическом отношении задачей. Принятая методика приведения характеристик фотометрических приборов к П-образным не только была трудно реализуемой, но и, по нашему мнению, не способствовала получению правильных результатов измерений.

Для снижения погрешности измерения применяются различные методы: ограничение типов источников излучения, введение поправочных коэффициентов и так далее. Благодаря найденному компромиссу, нам удалось найти возможность снизить суммарную погрешность измерения УФ излучения до 10 % в серийно выпускаемых УФ радиометрах ТКА-АВС и Аргус.

Незаслуженно забыты специально созданные индикаторные приборы, которые предельно просты в эксплуатации и энергоэкономичны.

Вероятно, по результатам новых исследований и рекомендаций МКО в ближайшем будущем потребуются проводить измерения отдельно в спектральных диапазонах А1 (315–340) и А2 (340–400). Эти спектральные зоны в светодиодных светильниках предположительно оказывают наибольшее воздействие на окружающую среду.

Среди разнообразия приборов следует отметить прибор «Хранитель» компании «ТКА», в котором специально для музеев повышена чувствительность в УФ диапазоне и одновременно производятся измерения 5-ти основных параметров микроклимата.

4.3. Измерение цветовых характеристик

Измерение спектрального состава света может иметь существенное значение как для безопасности хранения

Рекомендуемый максимальный уровень УФ облучённости материалов по группам светостойкости

| Объект облучения | Группа материалов по светостойкости | Энергетическая УФ экспозиция, вызывающая заметное изменение цвета материалов, Вт·ч /м ² | Рекомендуемый предел УФ облучённости, не более, мВт/м ² | | |
|--|-------------------------------------|--|--|--------------------------|---|
| | | | Для постоянных экспозиций | Для временных экспозиций | Для длительного хранения (>2-х лет) и для особо ценных экспонатов |
| Газеты, книги | 3 | 68 | 24 | 40 | 3 |
| Фотографии | 3 | 60 | 21 | 35 | 2 |
| Марки | 3 | 80 | 28 | 45 | 3 |
| Рукописи на бумаге и на пергаменте | 3 | 50 | 18 | 30 | 2 |
| Иконопись | 3 | 100 | 35 | 50 | 3,5 |
| Акварель | 3 | 80 | 28 | 45 | 3 |
| Чернила (в том числе цветные) | 3 | 60 | 21 | 35 | 2 |
| Тушь | 3 | 60 | 21 | 35 | 2 |
| Темпера | 3 | 80 | 28 | 45 | 2 |
| Пастель | 3 | 80 | 28 | 45 | 3 |
| Ковры, гобелены, ткани, одежда, кружева, мех, кожа | 3 | 80 | 28 | 45 | 3 |
| Коллекции насекомых, чучела птиц и животных | 3 | 80 | 28 | 45 | 3 |
| Живопись маслом | 2 | 150 | 52 | 90 | 6 |
| Изделия из кости | 2 | 400 | 139 | 180 | 14 |
| Деревянная утварь, мебель | 2 | 500 | 174 | 220 | 20 |
| Гуашь | 2 | 150 | 52 | 90 | 6 |
| Отдельные виды светочувствительных минералов и ювелирных изделий | 2 | 1000 | 350 | 350 | 30 |

Примечания:

1. Предельные значения УФ облучённости приведены для любых источников света при ежедневном 8-часовом экспонировании.
2. Приведённые в табл. 2 значения являются предельно допустимыми с обязательным их уменьшением, если это не влияет на качество зрительного восприятия экспоната.
3. Если уровень УФ облучённости, создаваемый в помещении общим освещением, превышает указанные в табл. 2 пределы, то экспозицию следует временно прекратить и принять меры для защиты экспонатов. Меры защиты могут быть как технического, так и организационного характера.
4. Нижний предел УФ облучённости не нормируется, и во всех случаях следует стремиться к минимальным достижимым значениям.

и экспозиции, так и для лучшего представления экспонатов [10]. Множество выпускаемых моделей, в том числе компактных, в принципе, могут обеспечить измерение основных спектральных характеристик музейного освещения. Созданный для решения поставленной задачи спектроколориметр

(рис. 6) обладает необходимыми метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Спектроколориметры «ТКА-ВД» предназначены для измерений координат цветности и коррелированной цветовой температуры источников света в международной колориметрической

системе МКО 1931 г. и 1976 г., освещённости и яркости. Прибор внесён в Госреестр средств измерений РФ. В новой версии существенно улучшено спектральное разрешение и появилась возможность беспроводной передачи результатов измерений на ПК и гаджеты.

Рис. 6.
Спектроколориметр
ТКА-ВД



Рис. 7. Дистанционный
яркомер «ТКА-КИНО»



4.4. Измерение яркости

Дистанционное измерение яркости вполне обеспечивается обновлённой версией яркомера «ТКА-Кино» (рис. 7). Это простой и надёжный прибор, одним нажатием кнопки позволяющий измерять яркость освещённой поверхности. Он также может быть использован для оценки принятого в музейной практике показателя контраста² и распределения яркости.

В музеях находят широкое применение регистраторы для контроля температуры и влажности, которые должны дополняться регистраторами уровня освещённости или УФ облучённости с беспроводной передачей данных. Существует ещё ряд задач, которые могут быть решены при заинтересованности музеев. Необходимо восстанавливать содружество разработчиков и производителей измерительной техники и музейных специалистов.

² Принятое в музейной практике отношение яркостей самой светлой и самой тёмной частей фона или изображения.

5. Заключение

Проведённые исследования и созданные на их основе средства измерений могут, в принципе, быть использованы при оценке музейного освещения. Однако малая изученность воздействия светодиодного освещения на музейные материалы не позволяет без дополнительных работ сделать вывод об изменении действующих правил и существенно увеличить допустимые уровни освещённости и УФ облучённости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Saunders, D.* The Environment and Lighting in the Sainsbury Wing of the National Gallery // ICOM Committee for Conservation, 1993, vol.11, Lighting and Climate Control.
2. *Thomson, G.* The museum environment. 2nd ed. London: Butterworths, 1981.
3. *Aydinli, S., Hilbert, G.S., Krochmann, J.* Uber die Gefährdung von Ausstellungsgegenständen durch optische Strahlung // Leichtforschung. – 1983. – Vol. 5, No. 1. – P. 35–47.
4. CIE157:2004 Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation // CIE, 2004.

5. *Иванов Ю.П., Кузьмин В.Н., Томский К.А.* Рекомендации по нормированию освещённости в музеях и библиотеках. – М.: Управление музеев Министерства культуры РФ, 1997. – 14 с.

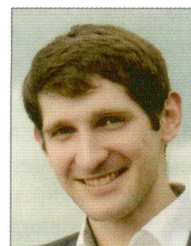
6. *Fechner Gustav Theodor* // In Sachen der Psychophysik // Leipzig, Breitkopf und Hartel – 1877. – 248 стр.

7. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23–05–95*.

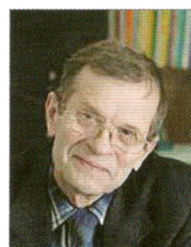
8. *Игнатъев В.Г., Боос Г.В.* Что будем делать с люксметрами Ю-116 и Ю-117? // Научно-техническая конференция «Фотометрия и её метрологическое обеспечение», М., 1997, с. 27.

9. CIE53:1982 Methods of characterizing the performance of radiometers and photometers. – Bureau Central de la CIE, Paris-France, 1982.

10. *Шанда Я.* Что такое точность воспроизведения цвета в музейном освещении? // Светотехника. – 2014. – № 5. – С. 23–27.

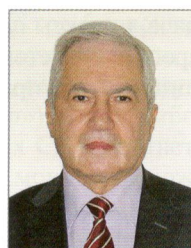


Баев Сергей Сергеевич. Окончил Санкт-Петербургский Государственный Институт Кино и Телевидения (СПБИКиТ) (2015 г.). В настоящее время – аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета ИТМО



Кузьмин Владимир Николаевич, доктор технических наук. Окончил КГУ (1971 г.) по специальности оптика и фотометрия. Заместитель генерального директора НТП «ТКА» по

оптике и фотометрии, профессор базовой кафедры светотехники СПБИКиТ



Томский Константин Александрович, доктор технических наук, профессор. Окончил СЗПИ (1972 г.) по специальности «Радиотехника», генеральный директор НТП «ТКА», заве-

дующий базовой кафедрой светотехники СПБИКиТ