



DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-36

Моделирование показателя дискомфорта на основе методов компьютерной графики

Д.Н. Макаров, ORCID: 0000-0002-5043-8911 <makarovd@list.ru>

В.П. Будак, ORCID: 0000-0003-4750-0160 <budakvp@gmail.com>

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 17.

Аннотация. Статья представляет усовершенствованную методику вычисления объединенного индекса дискомфорта (UGR), направленную на повышение адекватности оценки условий освещения. Критикуя ограниченность существующих расчётных систем (DIALux, Relux), авторы предлагают комбинированный подход, использующий ресурсы компьютерной графики (пакет 3ds Max) для моделирования и математической платформы (Matlab) для анализа. Инновационная составляющая заключается во внедрении алгоритма кластеризации, который заменяет ресурсоёмкий попиксельный анализ источников бликов. Это позволяет увеличить точность определения UGR на 10% и приблизить модель к биомеханизмам зрения. Полученные данные подчёркивают существенное влияние коэффициентов отражения (при $\rho > 0.8$) на уровень дискомфорта. Разработанный метод представляет практический интерес для специалистов в области проектирования освещения и архитектуры.

Ключевые слова: Объединенный показатель дискомфорта (UGR); зрительный дискомфорт; зеркальные отражения; компьютерная графика; 3D-визуализация; кластеризация источников бликов; коэффициент отражения; трассировка лучей; программное обеспечение светотехнического проектирования; физиология зрительного восприятия.

Для цитирования: Макаров Д.Н., Будак В.П. Моделирование индекса дискомфорта на основе методов компьютерной графики. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 3, часть 3, 2026 г., стр. 65–78. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-36.

A Computer Graphics Approach to Discomfort Index Modeling

D.N. Makarov, ORCID: 0000-0002-5043-8911 <makarovd@list.ru>

V.P. Budak, ORCID: 0000-0003-4750-0160 <budakvp@gmail.com>

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
17, Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia.

Abstract. The article presents an enhanced methodology for calculating the Unified Glare Rating (UGR), aimed at improving the adequacy of lighting condition assessments. Criticizing the limitations of existing calculation systems (DIALux, Relux), the authors propose a combined approach that utilizes computer graphics resources (the 3ds Max package) for modeling and a mathematical platform (Matlab) for analysis. The innovative aspect lies in the implementation of a clustering algorithm, which replaces the computationally intensive per-pixel analysis of glare sources. This increases the accuracy of UGR determination by 10% and brings the model closer to the biomechanisms of vision. The obtained data underscores the significant impact of reflection coefficients (at $\rho > 0.8$) on the level of discomfort. The developed method is of practical interest for specialists in the fields of lighting design and architecture.

Keywords. Unified Glare Rating (UGR); visual discomfort; specular reflections; computer graphics; 3D visualization; glare source clustering; reflection coefficient; ray tracing; lighting design software; visual perception physiology.

For citation: Makarov D.N., Budak V.P. A Computer Graphics Approach to Discomfort Index Modeling. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 3, part 3, 2026, pp. 65-78 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-36.

1. Введение

Качественные показатели освещения представляют собой ключевые светотехнические характеристики осветительных установок, оценивающие визуальное восприятие и определяющие степень зрительного комфорта и пригодности среды для выполнения рабочих задач [1].

Чувствительность зрительного аппарата определяется в первую очередь яркостью, а не освещенностью. Следовательно, критерии качества освещения базируются на оценке распределения яркости объектов и окружающей сцены. Актуальной задачей современной светотехники является разработка методов моделирования и оценки пространственно-углового распределения яркости (ПУРЯ), одним из инструментов для которой служит генерация фотореалистичных изображений на основе алгоритмов адаптивной трассировки лучей.

Ведущим нормативным качественным параметром является объединенный показатель дискомфорта (UGR), количественно характеризующий степень слепящего воздействия и закрепленный в соответствующих стандартах. Он позволяет прогнозировать уровень зрительного комфорта в помещениях с проектируемыми осветительными установками.

Широко распространенное программное обеспечение для светотехнического расчета, такое как DIALux (Германия) и Relux (Швейцария), основано на методе конечных элементов и решает уравнение излучательности в диффузном приближении, а не полное уравнение глобального освещения для яркости. Данный подход не учитывает вклад вторичных зеркальных бликов.

Появление DIALux evo, в ядре которого реализован метод фотонных карт, стало шагом вперед в моделировании освещения. Однако алгоритм расчета UGR в данной платформе остался прежним, что не позволяет преодолеть указанное ограничение и дает лишь приблизительную оценку дискомфорта.

В существующих системах автоматизированного проектирования (САПР), включая указанные, при расчете UGR учитываются лишь прямые излучатели (светильники), яркость которых является исходной данностью. Это исключает из анализа яркость зеркально отраженных изображений источников света, что приводит к неполной оценке дискомфорта ощущений, формируемых всей сценой освещения.

В этой связи ведется активная разработка новых методов оценки качества освещения. Однако внедрение комплексных методик, основанных на построении новых психофизических шкал, требует масштабных исследований и отсрочено во времени. В то же время, развитие архитектурных решений и применение высокоотражающих отделочных материалов актуализирует необходимость оперативной оценки влияния зеркальных бликов на комфорт уже на текущем этапе.

В данной статье предлагается методика, направленная на реализацию неиспользуемого потенциала расчета UGR в современных САПР. Она основывается на определении источников блескости через анализ распределения яркости, смоделированного в специализированных программах трехмерной визуализации, на примере пакета 3ds Max.

2. Постановка задачи

Основной целью работы является: создание программы для более точного расчета показателя дискомфорта UGR по изображению распределения яркости и сравнение результатов работы с расчетом в программе DIALux evo.

В работе предполагается выполнение следующих задач:

- 1) Сравнение светотехнических расчетов в DIALux evo и 3Ds Max.
- 2) Разработка программы для попиксельного расчета UGR в Matlab.
- 3) Проверка метода расчета UGR на реальной ОУ по фотометрическим характеристикам.
- 4) Разработка методики уточненного расчета показателя дискомфорта UGR.

3. Теория

Что такое зрительный комфорт? Одна из точек зрения состоит в том, что зрительный комфорт – это просто отсутствие зрительного дискомфорта [2]. Зрительный дискомфорт определяется в [3] как неприятные ощущения, характеризующиеся чувством неудобства и напряженности, возникающие в основном в результате наличия в освещаемом пространстве резких различий яркости или неудачного выбора спектра излучения источника света. Также принято разделять зрительный дискомфорт, относящийся к психологическому восприятию, и нарушение зрительных функций или ослепление.

Основные механизмы, которые приводят к восприятию дискомфорта ослепленности, до сих пор мало изучены. Важность оценки ослепленности подчеркивается Международной комиссией по освещению (CIE) в документе под названием «Исследовательская дорожная карта для здорового внутреннего освещения», опубликованном в 2016 году [4].

Наличие яркости, значительно превышающей среднюю для поля зрения, вызывает дискомфорт и называется бликами. Блескость может проявляться в двух формах: ослепляющая блескость (disability glare) и дискомфортная блескость (discomfort glare).

Ослепляющая блескость – это форма, оказывающая негативное влияние на зрительную работоспособность. Блескость, вызывающая ощущение дискомфорта, называется дискомфортной. Общий негативный эффект ослепляющей засветки на зрительную работоспособность можно рассчитать, поскольку Холладей (1927) на основе тестов видимости вывел формулу, предсказывающую эквивалентную вуалирующую яркость. Её

значение зависит от освещённости на глазу (E_{eye}) и угла (θ) между направлением взгляда и направлением падения света от источника засветки.

С распространением светодиодных технологий особую актуальность приобрела проблема блескости и связанного с ней зрительного дискомфорта. Одним из способов её решения стало внедрение объединенного показателя дискомфорта (UGR) среди множества качественных характеристик освещения.

В настоящее время данный показатель, регламентированный, стандартом [5], служит основным критерием оценки качества неспециальных осветительных установок и реализован в большинстве современных системах автоматизированного проектирования осветительных установок.

Несмотря на достаточную эффективность методики расчета обобщенного показателя дискомфорта, в профессиональном сообществе продолжаются дискуссии относительно того, насколько он подходит для оценки систем на основе полупроводниковых источников света [6].

Согласно [7], UGR – это критерий оценки дискомфортной блескости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения.

Разработанный Международной комиссией по освещению (МКО) метод UGR (Unified Glare Rating), представленный в публикациях МКО 1995 и МКО 2010, получил мировое признание и включен во многие международные и национальные нормативные документы.

Методика предназначена для количественной оценки дискомфортной блескости, создаваемой светильниками внутреннего освещения, и базируется на расчетной формуле, представленной уравнением (1). CIE объединила лучшие элементы различных методов оценки бликов, использовавшихся на тот момент, в единую формулу. Благодаря этому «методу консенсуса» результат получил название «CIE Unified Glare Rating (UGR)»:

$$UGR = 8lg \left[\frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right] \quad (1)$$

где L_i – яркость блеского источника в направлении наблюдателя, $кд/м^2$, ω_i – угловой размер блеского источника, $стер$, p_i – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения по Гуту, L_a – средняя яркость поля адаптации наблюдателя, $кд/м^2$, рассчитывается через вертикальную отраженную освещенность на уровне глаз наблюдателя по формуле $L_b = E_{отр}/\pi$.

Суммирование происходит по всем источникам освещения в поле зрения.

Современный подход к оценке дискомфорта от освещения основан на расчете объединенного показателя дискомфорта UGR, который позволяет прогнозировать ослепляющий эффект осветительных установок на психофизической шкале дискомфорта. Шкала UGR основана на устаревшей Британской системе индекса ослепления, успешно применявшейся почти 30 лет. Описание зрительных ощущений по шкале UGR приведено в табл. 1.

Чем ниже значение UGR, тем меньше дискомфортного блеска и комфортнее освещение. Чем выше UGR, тем сильнее ощущение дискомфорта, напряжения и усталости глаз.

- UGR <10: блики практически незаметны.
- UGR = 28: блики вызывают невыносимый дискомфорт.

Минимально заметная разница в уровне дискомфорта ослепления составляет 1 единицу UGR, а разница в 3 пункта – явно ощутимому.

Меньшая величина показателя UGR соответствует более комфортному освещению. Производители светотехнического оборудования приводят значения UGR для

стандартных конфигураций светильников в типовых помещениях, что позволяет проводить сравнительный анализ различных моделей.

Табл. 1. Шкала ощущений UGR.

Table 1. Unified Glare Rating (UGR) scale.

UGR	Ощущение	Где применяется
≤ 10	Блеск отсутствует или незаметен	Высочайшие требования к визуальному комфорту и концентрации внимания: операционные в больницах, прецизионные лаборатории (электроника, часовое дело)
13	Блеск едва заметен	Высококчувствительные задачи (хирургические операции, читальные залы библиотек)
16	Заметный, но не раздражающий блеск	Стандартные офисные помещения, учебные классы. Требуется для большинства рабочих мест с постоянным пребыванием людей.
19	Заметный блеск, начинает вызывать дискомфорт	Помещения, где зрительная работа не является основной или постоянной: промышленные цеха (рабочие зоны без постоянной работы с мелкими деталями), столовые, спортивные залы, некоторые зоны розничной торговли.
22	Ощутимый дискомфорт	Технические помещения, гаражи, некоторые виды производств, подсобные помещения.
25	Сильный дискомфорт	Производственные цеха, склады (где блеск не критичен)
28	Невыносимо	Не рекомендуется для любых рабочих зон

Несмотря на широкое применение, метод UGR имеет ряд общепризнанных ограничений:

- 1) Применимость уравнения (1) – корректна только для малоугловых источников с равномерной яркостью и не учитывает протяженные неоднородные блики.
- 2) Угловые размеры источников – метод действителен в диапазоне 0.0003–0.1 стерadian; за его пределами требуются альтернативные подходы.
- 3) Условия наблюдения – расчет предполагает расположение наблюдателя у стены прямоугольного помещения с фиксированным направлением взгляда, что не всегда соответствует реальным условиям (например, работа за столом в центре комнаты).

Для очень малых источников света (телесный угол < 0.0003 ср) дискомфорт от бликов зависит от силы света, а не от яркости. В таких случаях система UGR не применяется (CIE 1995). Для них CIE (2002) предлагает формулу на основе силы света.

Для крупных источников (телесный угол > 0.1 ср, например, 1 м² с расстояния 3 м) система не проверена и её использование не рекомендуется [8].

Тем не менее, несмотря на эти ограничения, метод UGR остается практичным решением, доказавшим свою эффективность в большинстве случаев. Для источников света, выходящих за рамки его применимости, в публикации МКО (2002) предложены альтернативные методики оценки. Однако остаются нерешенные вопросы, связанные с методикой UGR.

4. Результаты экспериментов

Основной целью нашего исследования является разработка методики расчета UGR, которая будет учитывать зеркальные отражения, а также используемое программное обеспечение должно быть доступно и просто в использовании для любого проектировщика, то этим целям удовлетворяет программа 3ds Max от компании Autodesk, которая считается признанным лидером в своей области.

На рис.1 и 2 представлены визуализации расчетов освещения разными методами на которых можно наблюдать значительные отличия в деталях визуализации. При расчете трассировкой лучей на стенах и на полу наблюдаются многократные переотражения. Причем, нужно отметить, что весомый вклад в блёскость и визуальный дискомфорт вносят не только первые переотражения, но и вторые. В небольшом стандартном интерьере при наличии зеркальной компоненты отражения поверхностей больше 0,7 яркость первичных отражений может достигать 20% от яркости источника света, а яркость вторичных переотражений до 10% от яркости источника. В то время как в DIALux evo (см. рис.2) все эти вторичные источники в расчет UGR просто не войдут.

Также на примере шара на рис. 3 наблюдаем, что при внесении в сцену одного небольшого предмета с поверхностью с зеркальным характером отражения, можно получить дополнительные источники блескости, как на самом объекте, так и в отражении на полу. Это гарантированно повлечет за собой увеличение UGR. Это подчеркивает важность учета зеркальным отражений в сложных сценах освещения.



Рис. 1. Визуализация методом трассировки лучей в 3DS MAX.

Fig. 1. Ray-traced rendering in 3DS MAX.



Рис. 2. Визуализация методом фотонных карт в DIALux evo.

Fig. 2. Visualization by photon map in DIALux evo.

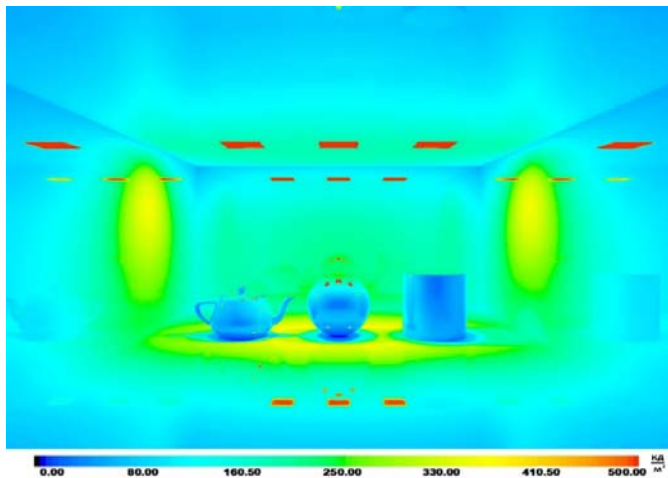


Рис. 3. Распределение яркости в 3DS MAX в псевдоцветах.
Fig. 3. Luminance distribution in pseudo-colors in 3DS Max.

Для того, чтобы посчитать вклад зеркальных бликов в показатель дискомфорта, проведем расчет в 3ds Max и сравним с расчетом для диффузных отражений в DIALux evo. Построим модель помещения с теми же размерами и ies профилями светильников, но вместо диффузного коэффициента отражения устанавливаем коэффициент направленного зеркального отражения на те же уровни, что и DIALux evo.

Программа 3ds Max очень точно рассчитывает распределение яркости и проводит визуализацию, но не предоставляет численные данные о распределении яркости напрямую пользователю. Для того чтобы получить точные численные значения распределения яркости, полученные при рендере освещения сцены, при экспорте данных из 3Ds Max будем использовать технологию High Dynamic Range Imaging (HDRI) - технология, предназначенная для захвата, обработки, хранения и визуализации изображений и видео с динамическим диапазоном, значительно превышающим возможности стандартных форматов (LDR/SDR).

Для проведения попиксельного расчета по распределениям яркости в качестве среды программирования была выбрана программа Matlab, так как она обладает высокой эффективностью и скоростью расчетов с матричным представлением данных. Именно такими данными и являются HDRI матрицы распределения яркости с большим количеством элементов – пикселей изображения. Также в Matlab есть специальный Image Processing Toolbox большой набор инструментов для работы с изображениями.

Для чтения EXR файлов в Matlab существует функция «exgread», однако она доступна в Image Processing Toolbox только начиная с MATLAB R2020b. Так как в статье разрабатывается методика, доступная для всех проектировщиков, то она должна работать не только на последней версии ПО. Если версия Matlab устарела, то можно использовать функцию «hdgread» и считывать каждый «HDRI файл», предварительно сохранив их в 3Ds Max о отдельности.

Для расчета UGR необходимо определить индекс позиции Гута для каждого пикселя. Согласно [9] индекс позиции p рассчитывается по специальной таблице, однако количество значений в таблице недостаточно для работы с изображением, поэтому нужно прибегнуть к интерполяции. Однако данный подход дает очень грубые результаты для большого количества пикселей в изображении. Поэтому было решено обратиться к опыту

корейских исследователей. В статье [10] предлагают вычислять индекс позиции по следующей формуле:

$$p = e^{(35.2 - 0.31889 \cdot \alpha - 1.22 \cdot e^{(-\frac{2\alpha}{9})}) + 0.001 \cdot \beta + (21 + 0.267 \cdot \alpha - 0.0029663 \cdot \alpha^2) \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2}, \quad (2)$$

где α – угол между линией зрения и линией, соединяющей наблюдателя с точкой под источником, в градусах, β – угол между линией зрения и линией от наблюдателя к источнику.

Определение углов α и β в пространстве сцены представлено на рис. 4. Условно обозначены источник S и перпендикуляр к горизонту H и наблюдатель значком глаза.

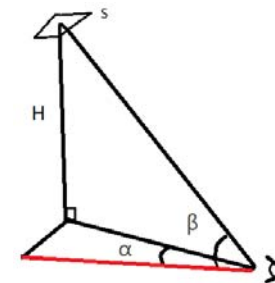


Рис. 4. Определение углов α и β для расчета индекса позиции p .
Fig. 4. Determination of angles α and β for calculating the position index p .

Полученная карта значений p может быть масштабирована для различных угловых размеров изображения. Отметим, что для поля зрения, соответствующего полному человеческому зрению ($200^\circ \times 120^\circ$), распределение значений p приближается к табличным значениям, что подтверждает справедливость данной формулы. В результате была получена карта значений p , представленная на рис. 5.

По данному распределению наглядно понятен физический смысл индекса позиции. Чем ближе источник к линии зрения, тем меньше значение p в формуле UGR и тем больше его вклад в дискомфорт.

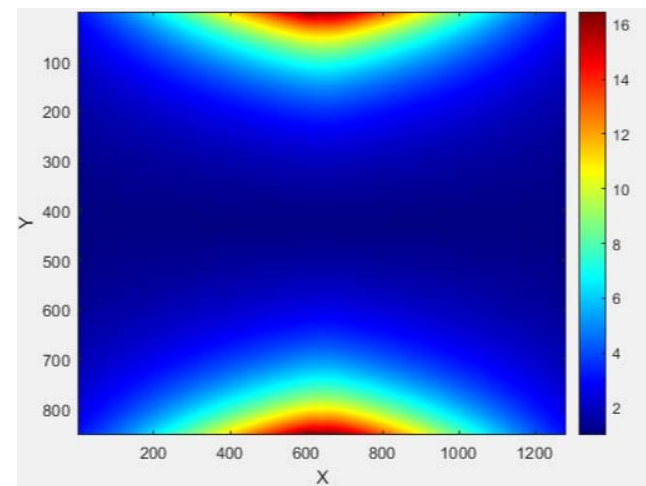


Рис. 5. Карта значений p для поля зрения $200^\circ \times 120^\circ$.
Fig. 5. p -value map for a $200^\circ \times 120^\circ$ field of view.

После вычисления всех необходимых параметров для расчета UGR, были рассчитаны вклады всех пикселей в дискомфорт и произведено суммирование по стандартной формуле UGR (1).

Для того, чтобы проверить работу методики попиксельного расчета необходимо сначала определить, какие пиксели будут являться источниками дискомфорта. Согласно МКО UGR рассчитывается по стандартной формуле только для источников направленного света, то есть формула применима только для первичных источников направленного света и вторичных источников, вызванных зеркальными отражениями.

Как же тогда выделить пиксели, которые войдут в расчет UGR? В работе [11] Желтов В.С. предлагает выделить пиксели с яркостью выше некоторого порога. Или выделить пиксели с резким перепадом яркости вокруг. Но этого может быть недостаточно, потому что по полученной визуализации и фотографии уже невозможно определить характер отражения светового пятна на поверхности. Вместо зеркального блеского источника, в расчет могут попасть пиксели с диффузно отраженным светом большой яркости. Помочь в определении природы источника может определение градиента яркости на границах пятна. Но это трудно реализуемая задача, не гарантирующая высокой точности результатов определения. Поэтому мы предлагаем обратиться к продвинутым технологиям 3D визуализации в компьютерной графике [12].

Пакет Corona render дает возможность разделения излучения на каналы в зависимости от пути, по которому свет добрался до камеры. В 3DS MAX (Corona Renderer) каналы рендера Sources, Direct, Reflect и Indirect распределяют свет следующим образом:

- 1) Sources (свет от источников) – это свет, который напрямую попадает в камеру от заданных первичных фотометрических источников света в сцене, взаимодействуя с поверхностями.
- 2) Direct (прямой свет) – это свет, который напрямую попадает на объекты из источников освещения (лампы, солнце и т.д.) и отражается диффузно.
- 3) Reflect (отраженный свет) – это свет, отраженный зеркально (гладкие поверхности, блики). Для полностью диффузных материалов (без зеркальности) этот канал должен быть пустым.
- 4) Indirect (непрямой, рассеянный свет) – это свет, который отражается рассеянно от других поверхностей при вторичных и многократных отражениях. Для полностью диффузной сцены это основной канал.

В 3D-рендеринге термины Direct, Reflect и Indirect связаны не с тем, что видит камера, а с путем света от источника до камеры.

Для согласования методики расчета с стандартом UGR и для приближения модели к реальной физиологии зрения был предложен новый подход. Используя алгоритм кластеризации, выделить области с наиболее резкими перепадами яркости на границе. Поскольку глаз реагирует именно на контраст и перепады яркости.

Теперь будем рассматривать каждую яркую область как единый источник с усредненной яркостью и общим телесным углом. Благодаря такому подходу сохраним главное преимущество попиксельного расчета – высокую детализацию при учете блеских источников.

В качестве алгоритма кластеризации используем функцию в Matlab. Для ее работы нам необходимо определить пороговый контраст источника с фоном, при котором будет детектироваться яркие области. В случае непрерывного ПУРЯ в сцене освещения контраст является отношением градиента распределения яркости по полю зрения к средней яркости по полю. Обобщенный контраст в точке сцены можно определить с помощью следующего уравнения (3):

$$K(x, y) = \frac{|\text{grad}(L(x,y)p(x,y))|}{\bar{L}}, \quad (3)$$

где x, y – координаты точки на проекции сцены, L – яркость данной точки в направлении наблюдения, \bar{L} – средняя яркость по полю зрения, $p(x, y)$ – функция, учитывающая различный вклад в реакцию в зависимости от расположения в поле зрения.

В уравнении (3) p имеет тот же физический смысл, что и индекс положения в формуле UGR. По данной формуле можно сделать вывод, что теперь изменение яркости по фону будет влиять на градиент яркости. Для того, чтобы ограничить порог изменения яркостей, которые не будут играть существенную роль в восприятии качества освещения в статье [10] исследователи предлагают использование определенного порога, ниже которого контрасты не следует учитывать.

Предполагается, что пороговый контраст будет определяться поставленной визуальной задачей.

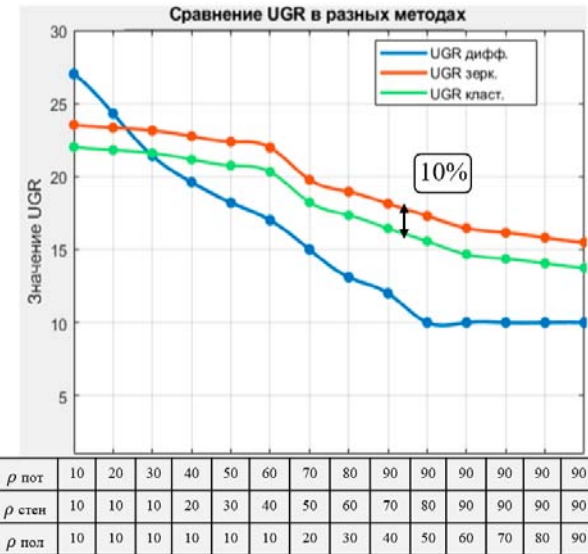


Рис. 6. Сравнения расчетов UGR методами кластеризации и попиксельного расчета.
Fig. 6. Comparison of UGR calculations using clustering and pixel-by-pixel calculation methods..

Значения, полученные методом кластеризации, оказались меньше, чем при попиксельном расчете в среднем на 1 единицу по шкале UGR. Средняя разница в процентном соотношении составила примерно 10%, рис.6. Это связано с отличиями в расчетных формулах, описанных выше, а также с тем, что мы намеренно не учитывали области с малыми контрастами на границе, которые не вызовут дискомфорт. Также мы избавились от таких нежелательных особенностей работы рендера, как возможность появления шумов и паразитных засветок при низких коэффициентах отражения поверхностей в сцене. Ожидается, что дальнейшее увеличение яркостей в сцене еще больше увеличит разницу между кластерным и попиксельным расчетом, потому что вклад ложных блеских пикселей при попиксельном расчете будет расти, тогда как точность кластерного расчета не изменится.

Метод кластеризации позволил уточнить значения UGR. Несмотря на то, что процентная разница в результатах между методами не критична для стандартного проектировании освещения, главным преимуществом данной методики является большее приближение данной модели к реальным механизмам зрительного восприятия. Также нужно отметить, что этот алгоритм затрачивает меньше вычислительных ресурсов, поскольку расчет UGR

проводится для небольшого количества источников в отличие от принудительного расчета для огромного количества пикселей в попиксельном методе.

С одной стороны, по зависимости для диффузного отражения видна тенденция на уменьшение UGR с ростом коэффициента отражения. Но при появлении зеркальной составляющей отражения, в сцене появляются вторичные источники, вносящие вклад в повышение UGR. Эффект двух противоположных тенденции складываются, поэтому в результате получается зависимость близкая к прямой. Однако снижение UGR за счет малых контрастов при высоких коэффициентах отражения превышает возможную компенсацию от появления вторичных источников, что приводит к итоговой тенденции спада. Соответственно при внесении дополнительных первичных источников света в сцену кривая пройдет еще выше и будет еще больше выпрямляться.

Благодаря данному методу расчета значения показателя UGR были уточнены. В результате исследования можно дать следующие рекомендации архитекторам. Даже при полном отсутствии зеркального отражения при $\rho < 0,2$ UGR превышает 25, что является недопустимым для большинства типов помещений.

В этом случае, чтобы преодолеть значимый для многих нормативов барьер в $UGR=20$ следует использовать материалы с немного большей составляющей диффузного отражения, например покрытых темной матовой краской, с напылением специальных темных порошков и покрытий.

Для приемлемой зоны $0,3 < \rho < 0,8$ зеркальные блики могут повысить показатель дискомфорта не более чем на один порог ощущений 3-4 единицы. Выбор отделки имеет широкий диапазон допустимых материалов и зависит от типа конкретного помещения и архитектурной концепции.

При высоких коэффициентах отражения $\rho > 0,8$ зеркальная компонента отражения уже не вносит ощутимого влияния на ощущения. Дискомфортная блескость становится минимальной при высоких коэффициентах отражения. Однако необходимо помнить про возникающую блескость насыщения и ограничивать предельную яркость в поле зрения до 1000-2000 кд/м² в зависимости от типа помещения.

Для подтверждения расчетов UGR по предлагаемой нами методике был проведен натурный эксперимент в реальном помещении учебной аудитории на кафедре светотехники НИУ «МЭИ».

В помещении были установлены два встраиваемых потолочных светильника 600x600 мм с матовым рассеивателем и с световым потоком 3800 лм каждый. Использовались диммируемые светильники (с регулируемой яркостью), чтобы провести измерения при разных световых потоках. Светильники абсолютно новые, не эксплуатируемые ранее. Соответственно они имеют неискаженные заводские параметры.

Таким образом, эксперимент в реальном помещении подтвердил теоретические ожидания о росте UGR при наличии в сцене поверхностей с низким коэффициентом отражения. Метод кластеризации позволил исключить шумы, однако значения все еще остаются выше, чем для 3D модели. Поэтому можно сделать вывод, что при упрощенном моделировании или при моделировании сложных 3М сцен нужно учитывать возможное занижение оценки UGR по сравнению с реальной осветительной установкой до 10%.

В результате исследования была сформирована комплексная методика для расчета UGR с помощью современных технологий компьютерной графики, ее можно представить в виде блок-схемы см. рис. 7.

Первый этап, стандартное моделирование. Создается 3D модель помещения, осуществляется подбор светильников.

Второй этап, использование САПР для получения визуализации с точным яркостным распределением.

Третий этап, программа в Matlab. Расчет UGR методом кластеризации.



Рис. 7. Методика расчета, представленная в виде алгоритма.
Fig. 7. Calculation methodology presented as an algorithm.

Благодаря проектно-ориентированный подходу удалось обеспечить удобное практическое применение методики и ее доступность для проектировщиков ОУ.

5. Выводы и заключение

Настоящая работа включает обзор исследований в области оценки дискомфорта от освещения, в рамках которого выявлены ключевые проблемы и недостатки существующих методов расчёта соответствующего показателя, требующие дальнейшего изучения. Существующие передовые методики применимы лишь к реальным объектам с уже смонтированным световым оборудованием. В связи с этим одной из задач данного исследования стала разработка метода, позволяющего оценивать показатель дискомфорта ещё на стадии проектирования осветительной установки (ОУ).

Анализ алгоритмов расчёта светотехнических параметров в программных комплексах DIALux 4.13 и DIALux evo подтвердил, что в них применяется стандартная методика расчёта унифицированного показателя дискомфорта (UGR), не учитывающая вклад зеркальных бликов от поверхностей.

Был проведён детальный анализ зависимости значения UGR от коэффициентов отражения поверхностей. На его основе сформулированы рекомендации для проектировщиков и архитекторов, направленные на снижение зрительного дискомфорта. Установлено, что увеличение коэффициентов отражения однозначно снижает ощущение дискомфорта в помещении. Однако при этом необходимо ограничивать значения яркости в пределах допустимого уровня, рассчитываемого для различных областей поля зрения в зависимости от соотношения яркости источников и яркости фона адаптации.

Разработана новая методика попиксельного расчёта UGR с использованием программных средств компьютерной графики. Применение технологии HDRi, доступной в пакетах для фотореалистичной 3D-визуализации, позволило получить точное распределение яркости в световой сцене с учётом зеркальных отражений. Дополнительный функционал рендерера Corona в среде 3ds Max обеспечил возможность разделения распределения яркости на отдельные слои в соответствии с характером прямого и отражённого света. Это позволило изолировать источники направленного света для их последующего учёта в расчёте UGR.

В среде Matlab разработана программа для попиксельного расчёта UGR, суммирующая вклад каждого блёского пикселя в общее значение показателя для всей сцены. В алгоритм программы внесены уточнения, учитывающие особенности физиологии зрения: моделирование широкого поля зрения, соответствующего человеческому, и корректировка формулы UGR для малых источников при работе с изображениями высокого разрешения.

Также предложен усовершенствованный алгоритм расчёта с применением кластеризации, лучше согласующийся с механизмом восприятия блёскости. Поскольку глаз реагирует на яркое пятно как на целостный объект, программа выделяет не единичные пиксели, а связные области пикселей, соответствующие источникам блёскости. Результаты расчёта UGR для простой световой сцены показали снижение значений показателя на 10% по сравнению с классическим попиксельным методом. В более сложных сценах с наличием зеркальных бликов и повышенными уровнями яркости ожидается более значительное расхождение результатов. Таким образом, удалось исключить вклад ложных пикселей в оценку дискомфорта и повысить точность расчётов.

В результате исследования сформирована методика уточнённого расчёта UGR с применением средств компьютерной графики, применимая как к распределениям яркости реальных объектов, так и к моделям ОУ на стадии проектирования.

Вместе с тем, проблема учёта неравномерности распределения яркости в пределах блёских источников при расчёте UGR требует дальнейших исследований. Также необходимо дополнительное изучение для уточнения критериев кластеризации. Перспективным направлением развития данной методики является интеграция нейросетевых технологий для прогнозирования значений UGR.

Список литературы / References

- [1]. Айзенберг Ю.Б., Боос Г.В. Справочная книга по светотехнике: учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования уровня бакалавриат и магистратура по направлению «Электроника и наноэлектроника». Редакция журн. «Светотехника»; науч. ред. С.Г. Ашурков, Л.П. Варфоломеев. 4-е изд., полностью перераб. и доп. Москва, 2019, 892с.
- [2]. Boyce P.R. Human Factors in Lighting. 3rd Edition. CRC Press. 2014.
- [3]. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч. 2: учебное пособие для вузов по специальности «Светотехника и источники света», 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989, 431с.
- [4]. Исследовательская дорожная карта для здорового внутреннего освещения, URL: <https://standards.globalspec.com/std/10011712/cie-218> (дата обращения: 23.03.2026).
- [5]. ГОСТ 33392-2015 «Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений».
- [6]. Питер Торнс Дискомфорт, обусловленный блескостью светильников с источниками света неравномерной яркости. Современная светотехника, 2020, №5.
- [7]. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
- [8]. Wout van Bommel. Interior Lighting. Fundamentals, Technology and Application. Nuenen, The Netherlands. Springer Nature Switzerland. 2019.
- [9]. ГОСТ 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы контроля.
- [10]. Kim W., Kim J. T. A Formula of the Position Index of a Glare Source in the Visual Field// Indoor and Built Environment, 2010, 20(1). pp. 47-53.
- [11]. Желтов В.С., Чембаев В.Д. Расчет UGR на основе пространственно-углового распределения яркости. Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении, 2019, № 4(06).
- [12]. Будак В.П., Макаров Д.Н. Компьютерная графика с приложением в светодизайн: учебник для высших учебных заведений, Москва: Редакция журн. «Светотехника», 2022, 264 с.

Информация об авторах / Information about authors

Денис Николаевич МАКАРОВ – кандидат технических наук. Окончил в 2005 г. МЭИ. Практикующий светодизайнер с 2002 года по настоящее время и доцент кафедры светотехники НИУ «МЭИ». Член редколлегии журнала «Светотехника / Light & Engineering». Сфера научных интересов: компьютерная графика в светотехнике, световой дизайн, проектирование архитектурного и интерьерного освещения.

Denis Nikolaevich MAKAROV – Cand. Sci. (Tech.). Graduated from Moscow Power Engineering Institute (MPEI) in 2005. Practicing lighting designer from 2002 to the present, and Associate Professor at the Department of Lighting Engineering, National Research University “MPEI”. Member of the Editorial Board of the journal Svetotekhnika / Light & Engineering. Research interests: computer graphics in lighting engineering, lighting design, architectural and interior lighting design.

Владимир Павлович БУДАК – доктор технических наук, профессор. Окончил в 1981 г. МЭИ. Главный редактор журнала «Светотехника / Light & Engineering» и профессор кафедры светотехники ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ». Действительный член Академии электротехнических наук РФ. Сфера научных интересов: теория переноса излучения, световое поле, поляриметрия, глобальное освещение, оптические методы дистанционного зондирования.

Vladimir Pavlovich BUDAK – Dr. Sci. (Tech.), Prof. He graduated from MPEI in 1981. He is Editor-in-Chief of the journal «Svetotekhnika / Light & Engineering» and professor at the Lighting Engineering Department at MPEI. He is also a Full Member of the Russian Academy of Electrical Engineering Sciences. His research interests include radiative transfer theory, light field, polarimetry, global illumination, and optical remote sensing.