

УДК: 628.987

DOI: 10.30987/2658-6436-2020-4-25-32

В.С. Желтов, В.Д. Чембаев

РАСЧЕТ UGR НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ

В статье рассматривается расчёт объединённого показателя дискомфорта (UGR) на основе пространственно-углового распределения яркости (ПУРЯ). В качестве метода моделирование ПУРЯ предлагается метод локальных оценок метода Монте-Карло. На основе ПУРЯ появляется возможность оценки качества освещения по многим критериям, в том числе по общепринятому UGR. UGR позволяет предварительно оценивать уровень комфорта выполнения зрительной задачи в осветительной установке. Предложен новый метод «попиксельного» расчёта UGR на основе ПУРЯ.

Ключевые слова: пространственно-угловое распределение яркости, UGR, глобальное освещение.

V.S. Zheltov, V.D. Chembaev

UGR CALCULATION BASED ON THE LUMINANCE SPATIAL-ANGULAR DISTRIBUTION

The article has considered the calculation of the unified glare rating (UGR) based on the luminance spatial-angular distribution (LSAD). The method of local estimations of the Monte Carlo method is proposed as a method for modeling LSAD. On the basis of LSAD, it becomes possible to evaluate the quality of lighting by many criteria, including the generally accepted UGR. UGR allows preliminary assessment of the level of comfort for performing a visual task in a lighting system. A new method of "pixel-by-pixel" calculation of UGR based on LSAD is proposed.

Keywords: luminance spatial-angular distribution, UGR, global illumination.

1. Введение

При проектировании осветительных установок инженер-проектировщик должен решать одновременно несколько задач. С одной стороны, при помощи правильно подобранного освещения можно наиболее ярко выразить дизайнерский замысел помещения и его предназначения. В то же время, освещение должно помогать решать поставленную зрительную задачу находящимся в этом помещении посетителям. Для достижения данных целей инженер-проектировщик обязан опираться на существующие на сегодняшний день нормативные документы, определяющие как качественные, так и количественные показатели освещения.

В современных нормативных документах для неспециальных осветительных установок (офисные, производственные, торговые и прочие) в качестве количественной характеристики нормируется освещённость и различные параметры, производные от нее (отношение минимальной освещённости к максимальной и т.п.). Как правило, при проектировании рассчитывается горизонтальная освещённость на интересующих поверхностях, так как пол или рабочий стол. Однако глаз человека реагирует на отраженный свет, но не на освещённость. Например, в абсолютно чёрной комнате можно добиться любой освещённости на стенах, но видно всё равно ничего не будет. Таким образом, необходимо иметь возможность нормировать яркость.

Среди множества качественных показателей для неспециальных установок существует объединенный показатель дискомфорта:

$$UGR = 8 \lg \left[\frac{0,25 \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2}}{L_a} \right], \quad (5)$$

где L_i – яркость блёского источника, кд/м², ω_i – угловой размер блёского источника, стер, p_i – индекс позиции блёского источника относительно линии зрения, L_a – яркость адаптации, кд/м².

UGR позволяет охарактеризовать качество освещения всего одним числом и вошел в нормативные документы [1]. При проектировании не специальных ОУ, таких как торговые, офисные, общественные, производственные помещения и др., инженер-проектировщик должен согласно нормам учитывать освещенность в качестве количественной характеристики и UGR для качественной оценки освещения. UGR позволяет определить – насколько комфортно человеку будет находиться в помещении с проектируемой осветительной установкой.

Формула (1) справедлива лишь для малоугловых равномерных блёских источников. Т.е. протяженные неравномерные блики она учесть не может в принципе. Важно отметить, что в основе таких популярных в светотехническом проектировании программ моделирования как DIALux и Relux лежит метод конечных элементов, и решается в них не уравнение глобального освещения относительно яркости, а уравнение излучательности в диффузном приближении. Таким образом, невозможно учесть влияние вторичных бликов. Существенным шагом вперед в светотехническом проектировании становится внедрение DIALux Evo основанного на методе фотонных карт. Однако методика расчета UGR в нем осталась прежней.

Таким образом, на сегодняшний день ОУ проектируются, лишь отдаленно оценивая, насколько комфортно будет человеку в ней находиться и решать зрительную задачу и нормируют невидимую характеристику – освещенность. Однако еще в начале прошлого века было высказано предположение, что ключевую роль в вопросе комфорта играет пространственно-угловое распределение яркости [2].

В данной статье предложен метод уточнения показателя дискомфорта UGR, при помощи метода попиксельного расчёта.

2. Пространственно-угловое распределение яркости

В основе моделирования осветительных установок лежит хорошо известное в компьютерной графике уравнение глобального освещения, впервые полученное James T Kajiya в 1986 году [3]

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi} \int L(\mathbf{r}', \hat{\mathbf{l}}') \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') |(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}')| d\hat{\mathbf{l}}', \quad (6)$$

где $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$ – яркость в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{l}}$, $\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}')$ – двунаправленная функция отражения (отражения или пропускания), L_0 – прямая компонента яркости, непосредственно от источников, $\hat{\mathbf{N}}$ – нормаль в точке \mathbf{r} к элементу поверхности сцены.

Уравнение записано относительно точки \mathbf{r} , находящейся на поверхности сцены, однако в задаче оценки качества освещения, наблюдатель находится в объеме сцены. После ряда преобразований, можно получить уравнение, записанное относительно точки в объеме сцены [4]

$$L_V(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r}_\Sigma, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi} C_{01} \int L(\mathbf{r}_1, \hat{\mathbf{l}}') \sigma(\mathbf{r}_\Sigma; \hat{\mathbf{l}}', \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_\Sigma) \times \\ \times \delta(\Pi(\mathbf{r} - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_\Sigma| \hat{\mathbf{l}})) \delta\left(\hat{\mathbf{l}} - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\right) d^3 r_1 \frac{d^3 r_\Sigma}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_\Sigma)^2} \quad (7)$$

где $G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_\Sigma)$ – ядро уравнения.

Уравнение (3) описывает пространственно-угловое распределение яркости (ПУРЯ) в каждой точке пространства сцены. Что позволяет подойти к вопросу оценки качества освещения на основе анализа непрерывного пространственно-углового распределения яркости.

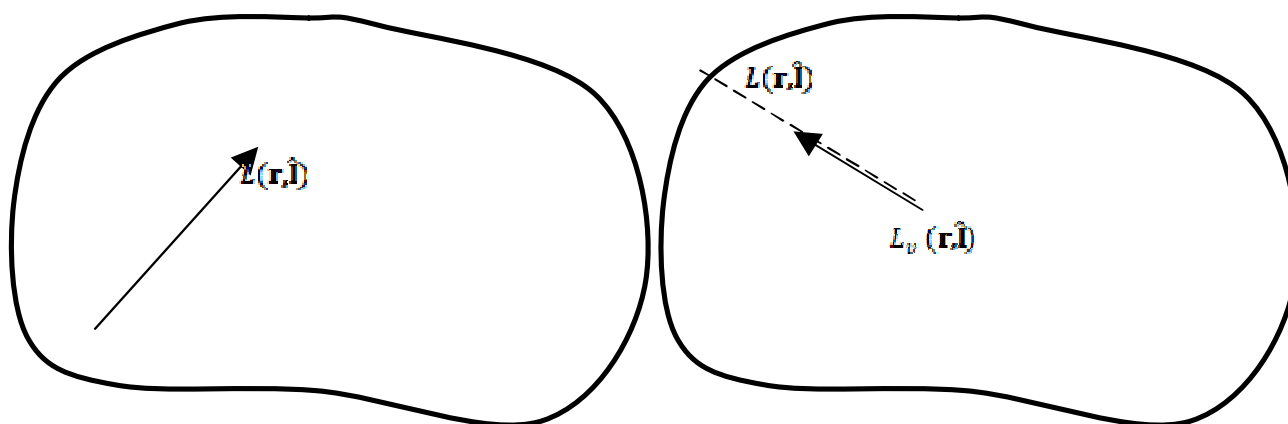


Рис. 1. Положения точек в пространстве сцены: слева – изображена точка на поверхности сцены, на рисунке справа – точка в пространстве сцены, где требуется определить яркость в заданном направлении

В 1997 году была опубликована работа «Instant Radiosity» [5]. Эта публикация положила начало новому подходу в решении уравнения ГО, которое в конечном счете в компьютерной графике не получило широкого распространения. Автор сформулировал алгоритм нового метода в феноменологическом подходе, не дав при этом полного его математического обоснования, используя лишь разрозненные формулы для описания отдельных частей процесса моделирования. Насколько мы видим, на сегодняшний день полной формулировки алгоритма так и нет.

В нашей работе мы предлагаем применить локальные оценки метода Монте-Карло к решению уравнения глобального освещения [6].

3. UGR на основе пространственно-углового распределения яркости

3.1. Влияние яркости отраженных светильников на UGR

Расчёт UGR в современных программах, таких как DIALux Evo, Relux, ведётся только для первичных блёских источников – непосредственно светильников. Однако в реальных ОУ в некоторых условиях может вовсе не быть блёских источников в поле зрения, но наблюдатель будет испытывать дискомфорт из-за наличия большого числа отражённых бликов.

В рамках работы был спроектирован в DIALux коридор, аналогичный коридору, расположенному на 5-м этаже кафедры светотехники МЭИ. Визуализация, полученная в DIALux представлена на рисунке 2.

Объединённый показатель дискомфорта в данном случае составил 20, для представленной на рисунке видовой точки по данным программы DIALux. Также был проведён «попиксельный» расчёт в созданной программе, в результате было получено значение UGR 20.49. После чего с помощью трассировки лучей были также получены изображения рассчитанной сцены при наличии у пола зеркальной компоненты 10, 20, 30, 40, 50 и 60 %. На рисунке 3 представлены визуализации коридора при коэффициентах отражения пола 30 и 60 %.

В результате были получены значения UGR представленные на рисунке 4.

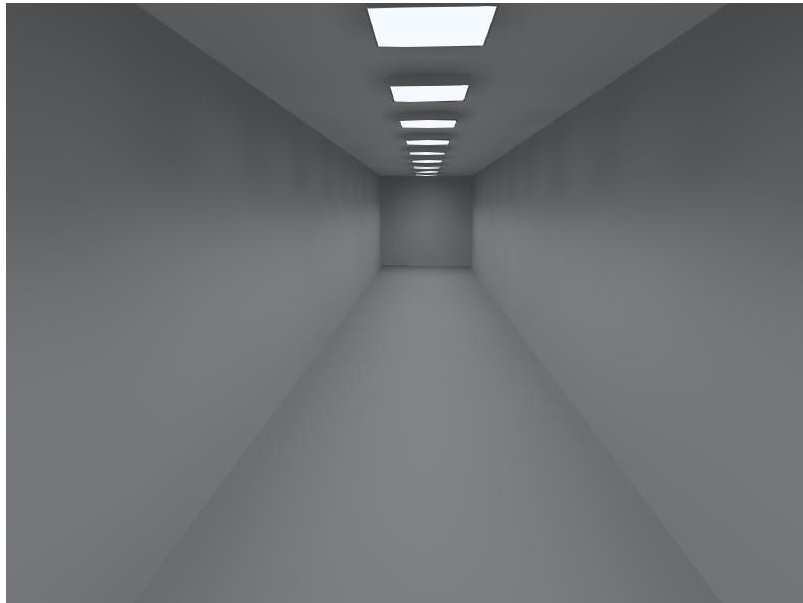


Рис. 2. Визуализация коридора

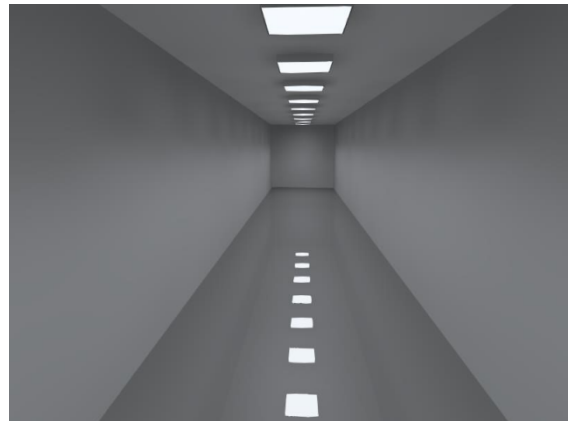
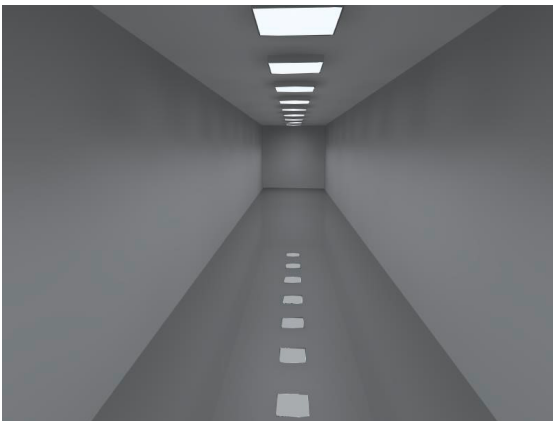


Рис. 3. Визуализация коридора при наличии зеркальной компоненты 30 и 60 %

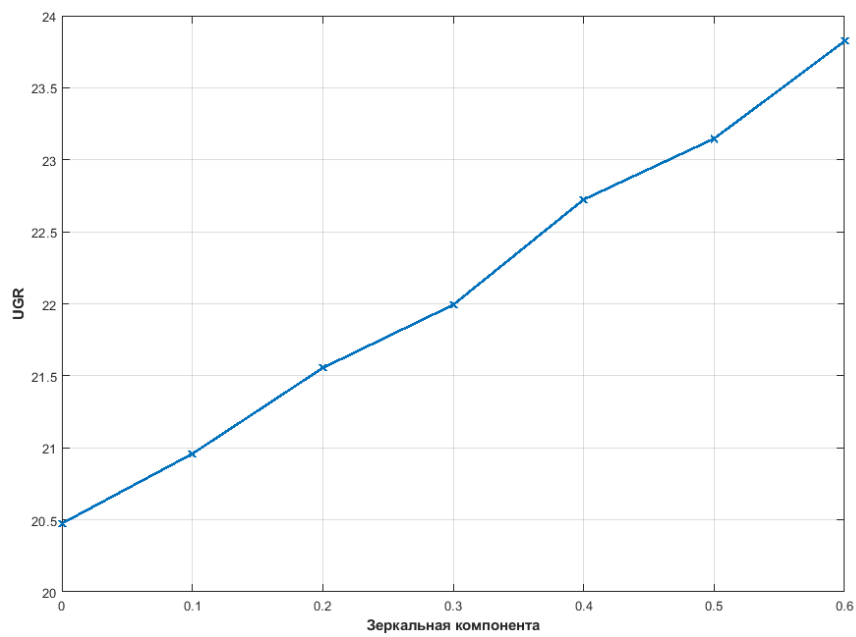


Рис. 4. Зависимость UGR от зеркальной компоненты отражения пола

По графику хорошо видно, что наличие блёских отражений на полу в коридоре увеличивает значение UGR, что является вполне закономерным и очевидным.

Таким образом, расчёт пространственно-углового распределения яркости позволяет более точно учитывать UGR. Отметим, что с точки зрения применяемых алгоритмов это возможно уже сейчас в программе DIALux Evo – в основе, которой лежит метод фотонных карт, который позволяет учитывать произвольный закон отражения и вычислять непосредственно яркость.

3.2. Влияние неравномерности яркого пятна на UGR при «попиксельном» расчете

В обычной инженерной практике при расчёте по яркостной фотографии были бы выделены отдельно блёские источники, яркость которых была бы взята как средняя. Очевидно, что при таком подходе и при расчёте попиксельно будет разница. В рамках работы было рассмотрено влияние углового размера неравномерного источника на UGR. В качестве источника был взят круглый блёский источник с распределением яркости по Гауссу, расположенный точно на линии зрения. Расчёт был проведен для двух источников с разной степенью неравномерности, показанных на рисунке 5.

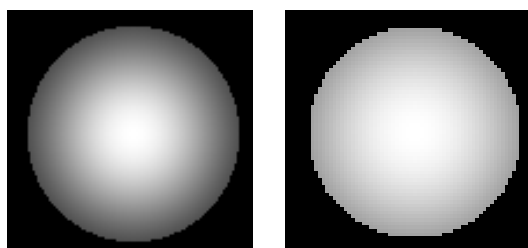


Рис. 5. Круглые блёские источники с распределением яркости по Гауссу

Результаты расчёта в зависимости от углового размера источника показаны на рисунке 6 для первого относительно равномерного источника и на рисунке 7 для более неравномерного.

Очевидно, что чем выше неравномерность источника, тем выше будет расхождение. Также, с ростом размера источника ошибка нарастает из-за влияния индекса позиции, который входит в формулу в квадрате и очень сильно меняется непосредственно в таблице с ростом угловых размеров источника.

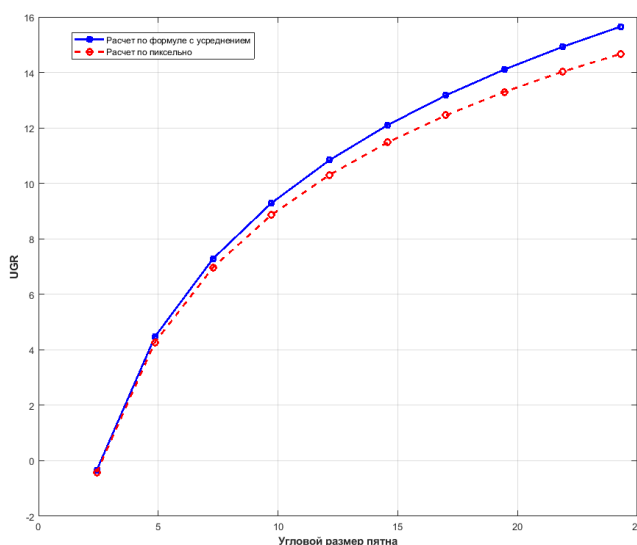


Рис. 6. Зависимость UGR от углового размера блёского источника

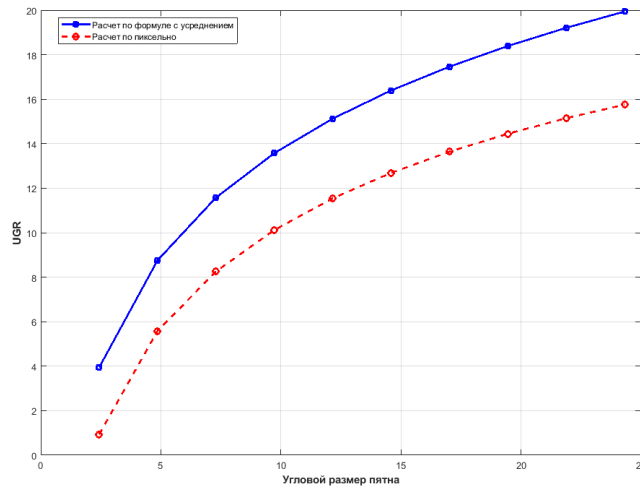


Рис. 7. Зависимость UGR от углового размера блёского источника

3.3. Попиксельный расчёт UGR

Полученные в эксперименте [7] яркостные фотографии, также были обработаны в созданной программе расчета UGR по пикселям. В качестве яркости адаптации была взята средняя яркость по полю. На рисунке 8 показана фотография станции Рассказовка и изображение блёских пикселей, которые вошли в расчёт UGR. В результате расчёта для каждой станции нескольких фотографий был получен средний UGR для станции. Формула UGR может использоваться для равномерных источников с угловыми размерами до 20 градусов, при этом формально в ГОСТ 33392-2015 не указано, на каком расстоянии они должны быть. Т.е. формально каждый яркий пиксель изображения может быть рассмотрен как точечный источник

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

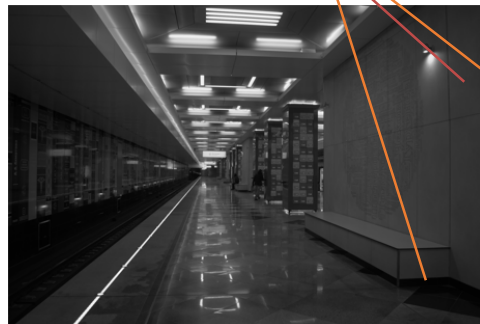


Рис. 8. Фотография станции Рассказовка и изображение пикселей, вошедших в расчёт UGR

После чего были построены карты рассеяния и вычислен коэффициент корреляции между значениями предложенного в работе критерия качества и UGR, а также между оценками наблюдателей и UGR. Полученные карты рассеяния приведены на рисунках 9 и 10.

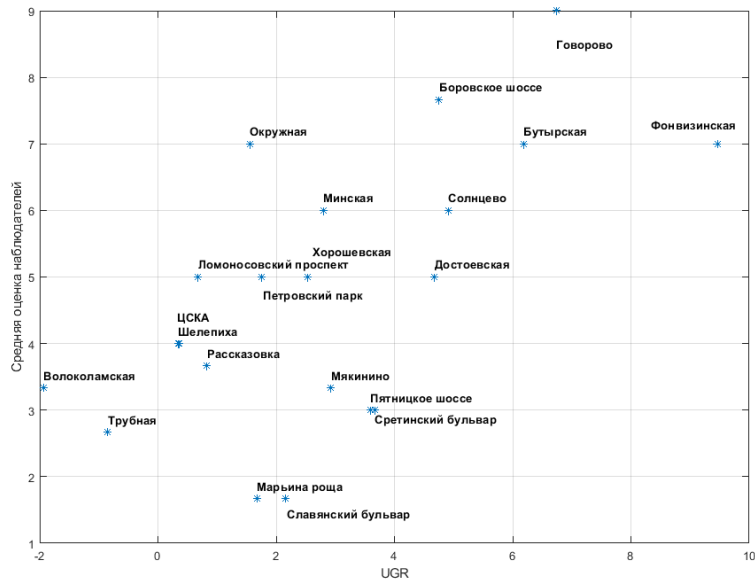


Рис. 9. Карта рассеяния UGR от оценки наблюдателей

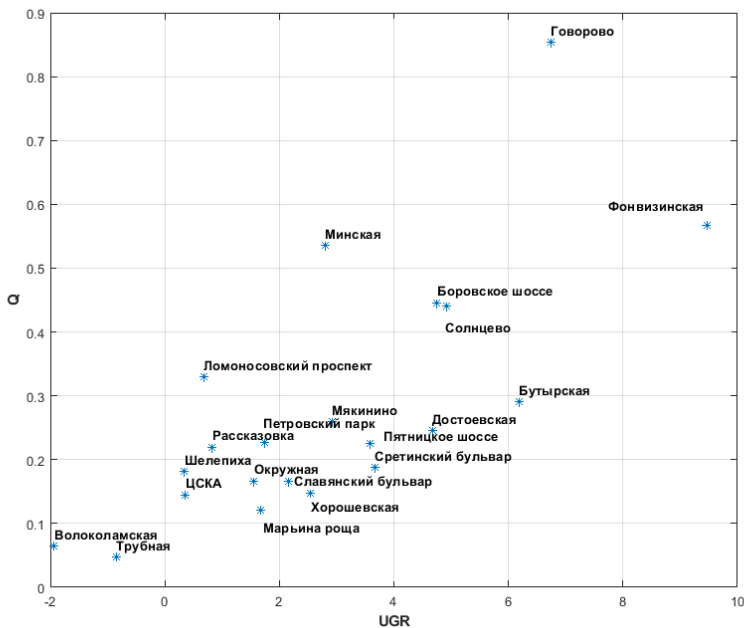


Рис. 10. Карта рассеяния UGR от предложенного критерия качества

4. Выводы

Из исследований еще 1915 года [2] известно, что одним из ключевых факторов, влияющих на восприятие зрителем качества освещения, является именно пространственно-угловое распределения яркости. До недавнего времени не было возможности моделировать

распределения яркости, однако сегодня уже есть и математические методы, и ряд готовых программных реализаций, позволяющих это делать. Например, метод локальных оценок метода Монте-Карло, или метод Фотонных карт. Одним из ключевых критериев оценки качества внутреннего освещения по сей день является UGR. Однако в классическом представлении UGR учитывает лишь вклад от малоугловых равномерных блёских источников света. Предложенный метод расчёта UGR на основе пространственно-углового распределения яркости, позволяет также учитывать вклад и от протяжённых неравномерных, в т.ч. отражённых источников, что позволяет уточнить оценку качества освещения, на основе критерия UGR.

Список литературы:

1. ГОСТ 33392-2015 Здания и сооружения. Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений // Техэксперт: [сайт]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200126373> (дата обращения: 09.11.2020).
2. Ferree, C. The efficiency of the eye under different conditions of lighting / C. Ferree, G. Rand // Trans. Illum. Eng. Soc. IES. – 1915. – Vol.10. – P.407-447.
3. Kajiya, J.T. The rendering equation / J.T. Kajiya, // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86). – 1986. – Vol.20. – No.4. – Pp.143-150.
4. Budak, V. Relation of instant radiosity method with local estimations of Monte Carlo method / V. Budak, V. Zheltov, R. Notfulin, V. Chembraev // Journal of WSCG. – 2016. – Pp.189-196.
5. Keller, A. Instant radiosity / A. Keller // SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1997. – Pp. 49-56 6.
6. Budak, V.P. Evaluation of illumination quality based on spatial-angular luminance distribution / V.P. Budak, V.S. Zheltov, T.V. Meshkova, R.Sh. Notfullin // Light & Engineering. – 2017. – Vol. 25. –No. 4. – P. 24-31.
7. Budak, V.P. Experimental study of the new criterion of lighting quality based on analysis of luminance distribution at Moscow metro stations / V.P. Budak, V.S. Zheltov, T.V. Meshkova, V.D. Chembraev, // Light & Engineering, 2020. – Vol. 28, No. 3. – P.98–105.

References:

1. GOST 33392-2015 Zdanija i sooruzhenija. Metod opredelenija pokazatelja diskomforta pri iskusstvennom osveshhenii pomeshhenij // Tehjeksper: [sajt]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200126373> (data obrashhenija: 09.11.2020).
2. Ferree, C. The efficiency of the eye under different conditions of lighting / C. Ferree, G. Rand // Trans. Illum. Eng. Soc. IES. – 1915. – Vol.10. – P.407-447.
3. Kajiya, J.T. The rendering equation / J.T. Kajiya, // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86). – 1986. – Vol. 20. – No. 4. – Pp. 143-150.
4. Budak, V. Relation of instant radiosity method with local estimations of Monte Carlo method / V. Budak, V. Zheltov, R. Notfulin, V. Chembraev // Journal of WSCG. – 2016. – Pp. 189-196.
5. Keller, A. Instant radiosity / A. Keller // SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1997. – Pp. 49-56 6.
6. Budak, V.P. Evaluation of illumination quality based on spatial-angular luminance distribution / V.P. Budak, V.S. Zheltov, T.V. Meshkova, R.Sh. Notfullin // Light & Engineering. – 2017. – Vol. 25. – No. 4. – P. 24-31.
7. Budak, V.P. Experimental study of the new criterion of lighting quality based on analysis of luminance distribution at Moscow metro stations / V.P. Budak, V.S. Zheltov, T.V. Meshkova, V.D. Chembraev, // Light & Engineering, 2020. – Vol. 28, No. 3. – P.98–105

Статья поступила в редколлегию 13.11.2020.

Рецензент:

канд. техн. наук, доц.,

Брянский государственный технический университет

Подвесовский А.Г.

Статья принята к публикации 25.11.2020.

Сведения об авторах:

Желтов Виктор Сергеевич

к.т.н., ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

E-Mail: zheltov@list.ru

Чембаев Виктор Дмитриевич

аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

E-Mail: chembervint@gmail.com

Information about authors:

Zheltov V.S.

phD., assistant department of lighting technology, Moscow Power Engineering Institute

E-Mail: zheltov@list.ru

Chembraev V.D.

post graduate student department of lighting technology, Moscow Power Engineering Institute

E-Mail: chembervint@gmail.com