

# О влиянии различных зон поля зрения на не связанное с формированием изображения воздействие света<sup>1</sup>

К. БРОЖИО\*, С. ВЁЛКЕР, М. КНООП, М. НИДЛИНГ

Берлинский технический университет, Берлин, Германия

\* E-mail: kai.broszio@tu-berlin.de

## Аннотация

Результаты исследований говорят о том, что ганглионарные светочувствительные клетки сетчатки (*ipRGC*) распределены по сетчатке неравномерно или имеют разную чувствительность. Тем не менее, в большинстве исследований в области не связанного с формированием изображения (*non-image forming*) воздействия света для определения количества света, попадающего в глаз, используются такие интегральные величины, как освещённость или взвешенная применительно к формированию мелатонина облучённость. В этой статье представлен теоретический подход к определению эффективного потока излучения применительно к возбуждению *ipRGC*, в котором учтена пространственная неравномерность чувствительности клеток. Исследования чувствительности сетчатки производятся редко и не являются всеобъемлющими, однако их методику легко можно применить в условиях, когда области с определёнными уровнями чувствительности заданы. Предварительные результаты показывают, что при одинаковых значениях вертикальной освещённости и одинаковых спектральных распределениях энергии излучения типичные системы освещения офисов могут оказаться менее эффективными в части не связанного с формированием изображения воздействия света, чем варианты с повышенной яркостью в центральной части поля зрения. Это может послужить объяснением неоднозначности результатов исследований не связанного с формированием изображения воздействия света, даже если эти исследования проводились в одинаковых условиях освещения.

**Ключевые слова:** освещение нижней части сетчатки, освещение меди-

альной части сетчатки, не связанное с формированием изображения воздействие света, освещение офисов, чувствительность сетчатки.

## 1. Введение

С момента открытия в 2002 г. ганглионарных светочувствительных клеток сетчатки (*ipRGC*) при проведении исследований в области освещения и проектировании осветительных установок всё большее внимание уделяется не визуальному (*non-visual*) и не связанному с формированием изображения (*NIF – non-image forming*) воздействию света. При этом освещение используется, например, для увеличения бодрости или качества сна, для уменьшения десинхронизации циркадных ритмов или для лечения сезонной депрессии. Большая часть исследований посвящена зависимостям воздействия от уровня, спектрального состава, продолжительности и временного режима освещения. Не главной, но также заслуживающей внимания представляется зависимость воздействия от направленности излучения и местоположения источника света, так как светочувствительностью обладает только небольшая (менее чем 1 %) часть ганглионарных клеток сетчатки [1], которые распределены по сетчатке неравномерно [2].

Только несколько публикаций, посвящённых влиянию пространственного распределения света, включают в себя описание освещения, реализованного в экспериментальной установке. Большинство этих исследований были проведены в период между 1992 и 2005 гг. (см. обзор в [3]). Условия освещения сильно изменялись от одного исследования до другого. Вертикальная освещённость на уровне глаз изменялась от 5 до 1000 лк, цве-

товая температура – от тепло-белого до холодно-белого света, создаваемого полихроматическими источниками света: люминесцентными лампами, галогенными лампами накаливания или светодиодами. Частичное освещение сетчатки осуществлялось благодаря использованию световых коробов, установленных в заданном месте поля зрения, или применению модифицированных щитков для глаз при наблюдении равномерно освещённого полукупола. Все исследования проводились в ночное время, иногда в период между 22:00 и 3:30. Условия освещения сохранялись на протяжении 60–240 мин, а для изучения влияния размеров и/или положения источника света использовалось подавление выработки мелатонина. Количество испытуемых изменялось от 6 до 32, причём возраст испытуемых также был разным.

Полученные результаты говорят о том, что большие источники света эффективнее маленьких [4]. Биноклярное воздействие света приводит к большему подавлению выработки мелатонина, чем монокулярное [5, 6]. Кроме того, результаты исследований показывают, что для людей освещение медиальной (приносковой) части сетчатки (*nasal exposure*) более эффективно, чем освещение латеральной (привисочной) части сетчатки (*temporal exposure*) [7, 8]. Похоже, что освещение нижней части сетчатки (*inferior exposure*) оказывает большее воздействие, чем освещение её верхней части (*superior exposure*) [9–11]. Эти результаты были частично подтверждены в [12]. Освещение верхней части сетчатки тепло-белым светом (800 лк, 2666 К) привело к уменьшению и задержке подавления выработки мелатонина по сравнению с освещением нижней части сетчатки при том же уровне освещённости глаза. Однако при использовании холодно-белого света (6060 К) такие же уровни освещённости приводили к сравнимому не связанному с формированием изображения воздействию света при освещении как нижней, так и верхней частей сетчатки.

Учитывая вышесказанное, возникают сомнения в том, что уровни освещённости или уровни меланипической облучённости (*melanopic irradiance*), используемые в настоящее время при исследованиях в области не связанного с формированием изображения воздействия света, под-

<sup>1</sup> По материалам доклада на конгрессе *Lux Europa-2017*.

Перевод с англ. Е.И. Розовского.

ходят для проведения сравнительных оценок этого воздействия, по причине того, что это интегральные параметры, измерение которых производится применительно ко всему полю зрения. Освещённость на сетчатке позволяет учесть анатомию человека [13], и её можно измерять при помощи настроенных датчиков освещённости (например, [14, 15]). Тем не менее, может потребоваться более чёткое разбиение поля зрения на зоны. И хотя количество проведённых исследований слишком мало для определения участков с разной чувствительностью *ipRGC*, в [16] имеются предложения по примерному отождествлению нечувствительных участков и участков с низкой и хорошей чувствительностью (рис. 1).

В данной работе была поставлена цель исследования пространственно-разрешённого эффективного потока излучения, стимулирующего *ipRGC* при разном пространственном распределении падающего света и постоянном уровне полной (для всего поля зрения) освещённости глаза.

## 2. Методика

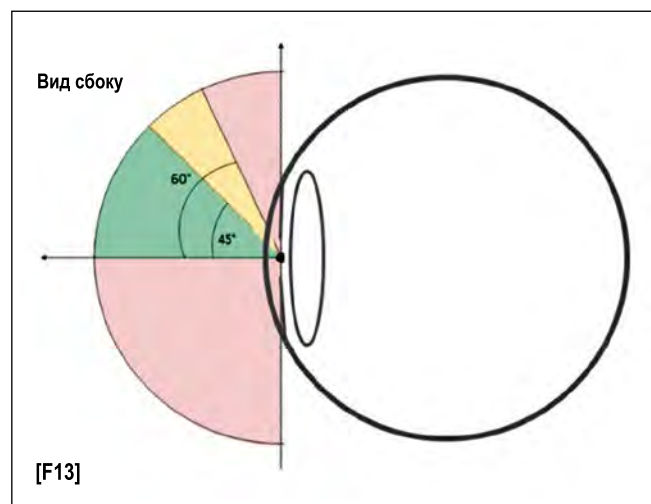
В данной работе проведена теоретическая оценка влияния повышенной чувствительности при освещении медиальной и нижней частей сетчатки. Для этого была разработана методика оценки вклада различных зон поля зрения в полную вертикальную освещённость глаза. Распределения яркости преобразовывались в матрицы, содержащие соответствующие разным пикселям значения яркости. Используя матрицу, содержащую угол раскрытия  $\omega_s$ , и дополнительную матрицу, содержащую соответствующие каждому из пикселей значения угла наклона  $\theta$ , можно рассчитать вклад различных зон в полную освещённость. В общем случае применимо следующее выражение:

$$E_p = \int L(\vartheta, \varphi) \cos(\theta) d\omega_s, \quad (1)$$

где  $E_p$  – освещённость,  $L$  – яркость пикселя, положение которого задаётся углами  $\vartheta$  и  $\varphi$ ,  $\omega_s$  – телесный угол,  $\theta$  – угол наклона.

Результирующая матрица содержит вклад каждого из пикселей в полное значение вертикальной освещённости. Так что имеется возможность

Рис. 1. Аппроксимация пространственной чувствительности, обусловленной плотностью или чувствительностью *ipRGC*, полученной в ряде исследований (на основе [16], участки со слабой и хорошей чувствительностью к не связанному с формированием изображения воздействию света обозначены, соответственно, жёлтым и зелёным цветом)



выделить представляющие интерес зоны поля зрения и рассчитать освещённость на уровне глаз, создаваемую каждой из этих зон.

### 2.1. Помещение для испытаний

В этой работе использовалось помещение для проведения испытаний кафедры светотехники Берлинского технического университета, освещённое светильниками с СД и имеющее типичные для офисов размеры (ширина 5 м, длина 4 м и высота 2,8 м). Это помещение оборудовано 1470-ю индивидуально управляемыми панелями с СД размером 18 x 18 см каждая, которые закрыты рассеивающим свет материалом. Каждая панель включает в себя 36 СД средней мощности холодно-белого или тепло-белого света. Значения коррелированной цветовой температуры ( $T_u$ ) расположенных за рассеивающим материалом панелей измерялись при помощи спектрометра *Specbos 1201* компании *Jeti Technical Instruments*. Значения  $T_u$  у СД холодно-белого и тепло-белого света были равны, соответственно, примерно 5900 и 2800 К. Смешанный свет имел  $T_u$  от 4400 до 4500 К, в зависимости от реализуемой сцены освещения. Для обеспечения хорошей равномерности и хорошего смешивания света как при совместном, так и при раздельном использовании, панели с СД холодно-белого и тепло-белого света были расположены в шахматном порядке. При помощи этой установки можно задать конкретное распределение яркости разных участков стен и потолка и разные значения  $T_u$ . Двенадцать светильников, расположенные в средней части потолка, были предназначены

для оптимизации не связанного с формированием изображения воздействия света, обеспечивая возможность изменения  $T_u$  в диапазоне от 2000 до 20000 К.

### 2.2. Условия проведения испытаний

В данной работе для получения одного и того же, равного  $500 \pm 2,5$  лк, значения вертикальной освещённости на уровне глаз были реализованы восемь распределений яркости, часть из которых была очень похожа на имеющие место при освещении офисов распределения, а часть сильно отличалась от них. Освещённость измеряли на высоте 1,2 м от уровня пола люксметром *MX-ELEKTRONIK Mini-Lux* с кремниевой фотометрической головкой с коррекцией под  $V(\lambda)$  и косинусной коррекцией. Дополнительно при помощи люксметра с косинусной коррекцией *LMT Pocket-Lux 2* измерялась горизонтальная освещённость на высоте 0,85 м в заданной точке стола.  $T_u$  освещения лежала в пределах от 3900 до 4900 К.

### 2.3. Измерения и обработка полученных результатов

Рассматриваемый в данной работе параметр – распределение яркости для восьми выбранных сцен (рис. 2) – измерялся при помощи фотояркомера *LMK mobile advanced* компании *TechnoTeam GmbH*, в котором используются камера *CANON EOS550D* и 4,5-мм объектив типа «рыбий глаз» с углом охвата  $140^\circ$ . Для каждого варианта были получены HDR-изображения яркости.

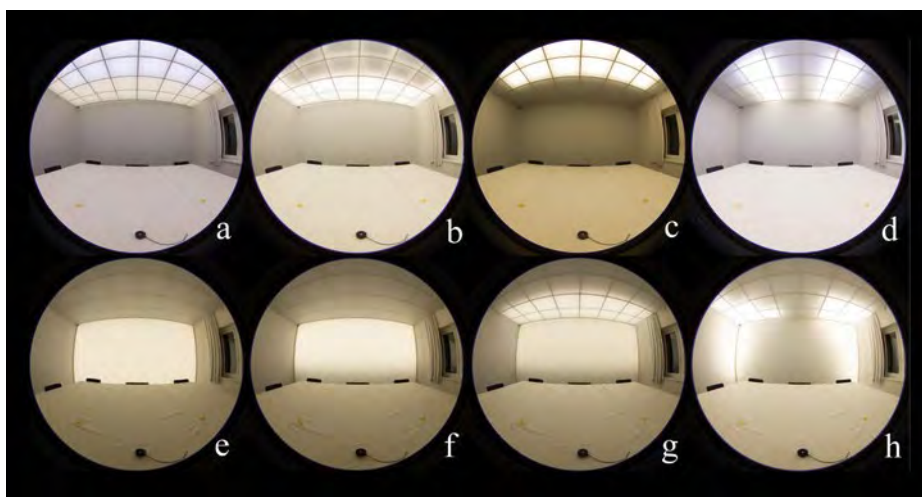


Рис. 2. Освещаемые сцены (типичное (a – d) и нетипичное (e – h) освещение офиса)

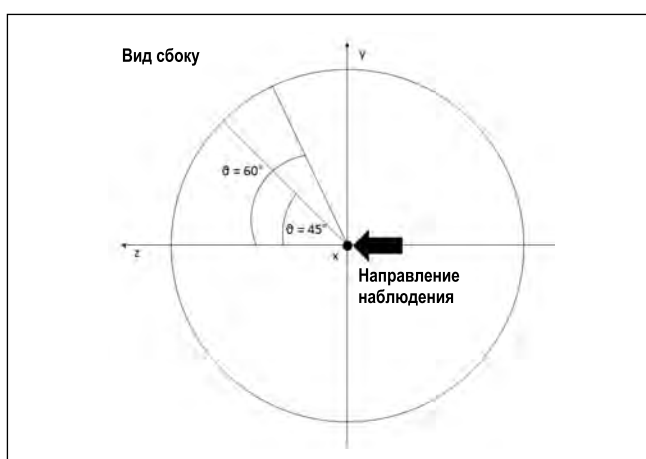


Рис. 3. Схема углов в поле зрения (на основе [13, 16])

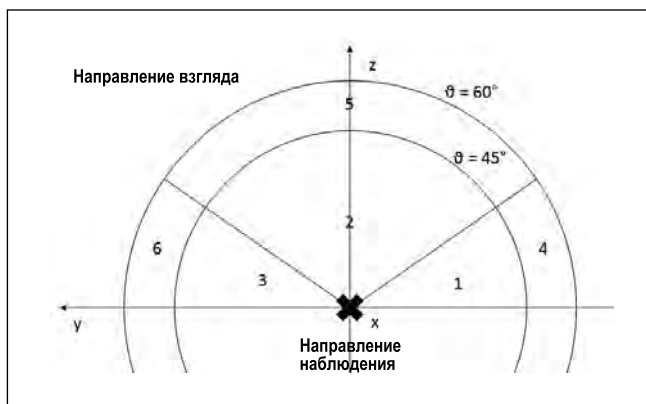


Рис. 4. Зоны поля зрения

Исходя из приведённой в [16] аппроксимации пространственной чувствительности сетчатки (рис. 1) и анатомических ограничений (например, экранирования света носом), были выбраны следующие зоны, позволяющие продемонстрировать потенциальные возможности и последствия пространственного разделения падающего на глаза света (рис. 3 и 4);  $\vartheta = (0^\circ, 45^\circ)$  и  $(45^\circ, 60^\circ)$ ;  $\varphi = (0^\circ, 55^\circ)$  и  $(0^\circ, -55^\circ)$  (по обе стороны от направления взгляда).

Свет, поступающий из зоны 1 (рис. 4), освещает только медиальную часть сетчатки правого глаза. Свет из зоны 2 освещает нижние части сетчаток обоих глаз, тогда как свет из зоны 3 освещает медиальную часть сетчатки левого глаза. Считается, что поступающий из этих зон свет оказывает существенное не связанное с формированием изображения воздействие, тогда как зоны, которым соответствуют углы  $\vartheta$ , лежащие в интервале между 45 и 60°, оказывают слабое воздей-

ствие, а при больших углах такое воздействие отсутствует [16]. Более того, зона 2 представляет особый интерес, так как было установлено, что одновременное освещение сетчаток обоих глаз приводит к повышенному подавлению выработки мелатонина [5, 6].

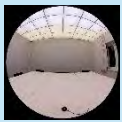
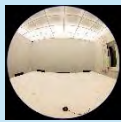
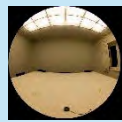
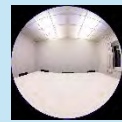
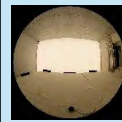

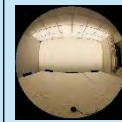
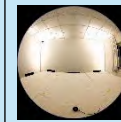






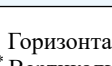
### 3. Результаты

Разработанная методика была использована применительно к восьми сценам освещения, которые показаны на рис. 2. Для каждой из зон поля зрения был рассчитан её вклад в полную освещённость. Полученные результаты, которые для большей наглядности выражены в процентах от измеренного значения вертикальной освещённости, приведены в табл. 1. Сценам освещения a – d, в которых свет поступает, главным образом, с потолка, соответствуют, в общем случае, низкие результаты. Например, вклад зоны с  $\vartheta = (0^\circ, 45^\circ)$  в общую освещённость составляет при этом всего лишь от 10 до 26 %. Если расширить зону до  $\vartheta = (0^\circ, 60^\circ)$ , то её вклад составит до 44 %. С другой стороны, сценам освещения e – h, в которых свет поступает, главным образом, от противоположной стены, соответствуют, в общем случае, относительно высокие результаты. Так, вклад зоны с  $\vartheta = (0^\circ, 45^\circ)$  в общую освещённость составляет при этом от 35 до 51 %, а вклад расширенной зоны с  $\vartheta = (0^\circ, 60^\circ)$  доходит до 58 %. Если же в соответствии с результатами, полученными в [5, 6], увеличить вес зоны 2, то различия между сценами a – d и сценами e – h будет даже большими.

### 4. Выводы и обсуждение

Разработан основанный на использовании фотояркомера метод оценки пространственно-разрешённого вклада разных зон поля зрения в общую освещённость. Эти зоны были выбраны таким образом, чтобы соответствовать освещению нижних медиальных частей сетчатки правого и левого глаза и одновременному освещению нижних половин сетчаток обоих глаз. Были исследованы типичные и нетипичные сцены освещения офисов. Полученные результаты говорят о том, что более стандартные схемы освещения офисов приводят к слабому освещению упомянутых частей сетчатки. В то же время, освещение, осуществ-

Значения освещённости

Зоны		Освещаемая сцена							
									
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
Освещённость	$E_v$ , лк	506	511	504	500	497	500	507	496
	$E_h^*$ , лк	657	694	619	640	263	276	329	338
	$E_v^{**}$ , %	2,8	3,2	2,0	2,8	9,5	10,6	7,5	8,5
	$E_v^{**}$ , %	15,1	19,2	5,6	17,3	24,3	29,2	28,6	19,1
	$E_v^{**}$ , %	2,8	3,1	1,9	2,6	9,9	11,1	7,7	7,3
	$E_v^{**}$ , %	20,7	25,5	9,5	22,6	43,7	50,8	43,8	34,9
	$E_v^{**}$ , %	1,5	1,7	1,0	1,3	1,2	1,3	1,5	2,1
	$E_v^{**}$ , %	14,0	11,0	18,6	18,4	4,2	4,2	9,0	10,5
	$E_v^{**}$ , %	1,5	1,7	0,8	1,2	1,6	1,6	1,8	5,4

\* Горизонтальная освещённость на высоте 0,85 м.

\*\* Вертикальная освещённость в процентах от измеренного люксметров значения.

ляемое противоположной стеной, приводит к значительному увеличению освещения этих частей сетчатки. При сходных спектральных распределениях энергии излучения и значениях вертикальной освещённости, типичные установки искусственного освещения офисов будут оказывать более слабое не связанное с формированием изображения воздействие, чем установки, обеспечивающие более высокую яркость в центральной части поля зрения, как это имеет место в случаях помещений с естественным освещением или при использовании бра, заливающих стены светом.

Следует отметить, что только в нескольких исследованиях были продемонстрированы различия в подавлении выработки мелатонина при освещении верхних и нижних частей сетчатки, и ещё меньше исследований продемонстрировали различия, обусловленные освещением медиальной и латеральной частей сетчатки. В настоящее время нельзя точно выделить конкретные части сетчатки и определить их весовой вклад в общее воздействие света. При этом, все исследования проводились в ночное время

с целью определения результирующего уменьшения уровня мелатонина. В то же время, в [17] было показано, что подавление выработки мелатонина само по себе не приводит к уменьшению сонливости, если сетчатка освещена лишь частично. Кроме того, эти результаты нельзя непосредственно распространить на дневное время. Днём механизм не связанного с формированием изображения воздействия света ещё не вполне понятен. Считается, что колбочки, свет на которые попадает, главным образом, из центральной части поля зрения, также влияют на не связанное с формированием изображения воздействие света [18]. Так что может оказаться, что, по меньшей мере, в условиях дневного зрения, следует учитывать распределение и спектральную чувствительность не одного, а нескольких рецепторов.

С этой точки зрения, описанную методику можно считать теоретическим подходом. Тем не менее, она представляет интерес, так как позволяет объяснить, почему в некоторых исследованиях было выявлено не связанное с формированием изображения воздействие света, а в некоторых –

нет, хотя использовавшиеся в них значения вертикальной освещённости и спектральные распределения энергии излучения источников света были схожими. Для сравнения этих исследований и введения поправок на влияние разных участков сетчатки и их чувствительностей, предлагается рассмотреть возможность учёта местоположения источника света (например, при помощи прослеживания хода лучей, как это сделано в [19, 20]).

В данном исследовании спектральное распределение энергии излучения не учитывалось. В дальнейшем предполагается проведение лабораторных и полевых исследований влияния пространственного и спектрального распределения излучения с использованием фотояркомера, включающего в себя колориметрические светофильтры и меланопический светофильтр (*melanopic filter*), что позволит оценить влияние пространственной неравномерности чувствительности на не связанное с формированием изображения воздействие света при типичных условиях освещения и непостоянстве спектрального распределения энергии излучения.

Авторы выражают искреннюю благодарность Фредерику Рудаускому (*Frederic Rudawski*) из Берлинского технического университета за разработку программного обеспечения, Александру Ли (*Alexander Lee*) из Берлинского технического университета за поиск литературных источников и Тобиасу Поршу (*Tobias Porsch*) из компании *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH* за предоставление характеристик фотоаппарата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Über die nicht-visuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen // Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., Berlin, vol. 1, 2015.
2. Schierz, C. Zur Photometrie nichtvisueller Lichtwirkungen // In Proc. of Symposium «Licht und Gesundheit», 2008. – P. 112–123.
3. Teikari, P. Spectral modulation of melatonin responses: role of melatonin bistability in pupillary light reflex // Ph.D. dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I, 2012.
4. Novotny, P., Paulick, P., Schwarz, M.J., Plischke, H. The Solid Angle of Light Sources and Its Impact on the Suppression of Melatonin in Humans // In Proc. 2013 Human-Computer Interaction. Towards Intelligent and Implicit Interaction Conf., 2013. Lecture Notes in Computer Science, Vol 8008. Ed. Kurosu. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – P. 454–463.
5. Wang, J.Y., Hanifin, J.P., Rollag, M.D., Brainard, G.C. Ocular regulation of the human pineal gland: The significance of total retinal exposure for melatonin suppression // In: Biologic Effects of Light, Ed. M.F. Holick and E.G. Jung. Boston, MA: 1998; Proceedings of a Symposium Basel, Switzerland, November 1-3, 1998. Springer US. – P. 367–374.
6. Brainard, G.C., Rollag, M.D., Hanifin, J.P. Photic regulation of melatonin in humans. Ocular and neural signal transduction // Journal of Biological Rhythms.– 1997. – Vol. 12. – P. 537–546.
7. Visser, E.K., Beersma, D.G.M., Daan, S. Melatonin Suppression by Light in Humans Is Maximal When the Nasal Part of the Retina Is Illuminated // Journal of Biological Rhythms.– 1999. – Vol. 14. – P. 116–121.
8. Rüger, M., Gordijn, M.C.M., Beersma, D.G.M., de Vries, B., Daan, S. Nasal versus Temporal Illumination of the Human Retina: Effects on Core Body Temperature, Melatonin, and Circadian Phase // Journal of Biological Rhythms.– 2005. – Vol. 20. – P. 60–70.
9. Lasko, T.A., Kripke, D.F., Elliot, J.A. Melatonin Suppression by Illumination of Upper and Lower Visual Fields // Journal of Biological Rhythms.– 1999. – Vol. 14. – P. 122–125.
10. Smith, J.S., Kripke, D.F., Elliot, J.A., Youngstedt, S.D. Illumination of upper and middle visual fields produces equivalent suppression of melatonin in older volunteers // Chronobiol-

ogy International.– 2002. – Vol. 19. – P. 883–891.

11. Glickman, G., Hanifin, J.P., Rollag, M.D., Wang, J., Cooper, H., Brainard, G.C. Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans // Journal of Biological Rhythms.– 2003. – Vol. 18. – P. 71–79.

12. Piazena, H., Franke, L., Thomsen, B., Kamenzky, I., Uebelhack, R., Völker, S. Melatonin suppression mit Weißlicht-LEDs – erste Ergebnisse // In Proc. of 8<sup>th</sup> Symposium Licht und Gesundheit, 2014. – P. 39–52.

13. Schierz, C. Ist die Beleuchtungsstärke am Auge die richtige Größe für biologische Lichtwirkungen? // In Proc. of DIN-Expertenforum «Wirkung des Lichts auf den Menschen», 2010. – P. 7–17.

14. Van Derlofske, J., Bierman, A., Rea, M.S., Maliyagoda, N. Design and optimization of a retinal exposure detector // In Proc. of Int. Society for Optics and Photonics – Int. Symp. on Optical Science and Technology, 2000. – P. 60–70.

15. Van Derlofske, J., Bierman, A., Rea, M.S., Ramanath, J., Bullough, J.D. Design and optimization of a retinal flux density meter // Measurement Science and Technology.– 2002. – Vol. 13, No. 6. – P. 821.

16. FGL (Fördergemeinschaft Gutes Licht) (2014), «licht.wissen 19 Impact of Light on Human Beings,» [Online]. Available: [http://en.licht.de/fileadmin/shop-downloads/1409\\_LW19\\_E\\_Impact-of-Light-on-Human-Beings\\_web.pdf](http://en.licht.de/fileadmin/shop-downloads/1409_LW19_E_Impact-of-Light-on-Human-Beings_web.pdf)

17. Rüger, M., Gordijn, M.C.M., Beersma, D.G.M., de Vries, B., Daan, S. Weak relationships between suppression of melatonin and suppression of sleepiness/fatigue in response to light exposure // Journal of Sleep Research.– 2005. – Vol. 14. – P. 221–227.

18. Lucas, R.J., Peirson, S.N., Berson, D.M., Brown, T.M., Cooper, H.M., Czeisler C.A., et al. Measuring and using light in the melanopsin age // Trends in neurosciences.– 2014. – Vol. 37. – P. 1–9.

19. Liedtke, C., Völker, S., Knoop, M. The Light Direction and Directional Light – Towards a new Quantification of an Essential Lighting Quality Criterion // In Proc. CIE Centenary Conf., 2013. – P. 542–551.

20. Knoop, M., Diakite, A., Liedtke, C., Broszio, K., Niedling, M. Characterisation of daylight's spatial and spectral distribution to assess its impact on human beings // Unpublished, presented at CIE Midterm Meeting, Jeju Island, Republic of Korea, 2017.



**Кай Брозио (Kai Broszio).** Аспирант (Ph.D.) и ассистент кафедры светотехники Берлинского технического университета. Внештатный член экспертной группы по внутреннему освещению Германского светотехнического общества.

Область научных интересов: влияние направленности света на не связанное с формированием изображения воздействие света



**Мартина Кнооп (Martine Knoop).**

Преподаватель кафедры светотехники Берлинского технического университета. Область научных интересов: характерные особенности естественного освещения,

разработка новых установок адаптивного искусственного освещения, улучшение самочувствия и работоспособности находящихся в зданиях людей



**Стефан Вёлкер (Stephan Voelker),** Dr.-Ing., профессор. Окончил Технический университет Ильменау. Заведующий кафедрой светотехники Берлинского технического университета. Председатель ТК 4–33

МКО и член ТК 4–54 МКО, член президиума Германского светотехнического общества, член экспертного совета по разработке стандартов в области светотехники (FNL & DIN). Область научных интересов: адаптивное дорожное освещение на основе видимости, адаптивной внутреннее освещение, оценка блёскости светильников с СД и естественное освещение



**Матиас Нидлинг (Mathias Niedling).**

Окончил Технический университет Ильменау. Аспирант (Ph.D.) кафедры светотехники Берлинского технического университета. Член Немецкого института стандар-

тизации (DIN) и член экспертной группы по наружному освещению Германского светотехнического общества. Область научных интересов: не связанное с формированием изображения воздействие света, блёскость, наружное освещение, влияние спектра излучения источников блёскости на дискомфортную и спящую блёскость