

ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА ПРИ СВЕТОДИОДНОМ ОСВЕЩЕНИИ – РИСКИ ЗДОРОВЬЮ

В.А. Капцов¹, В.Н. Дейнего²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены Роспотребнадзора, Россия, 125438, г. Москва, Пакгаузное шоссе, 1, корп. 1

²Новые энергетические технологии, Россия, 143025, Московская обл., деревня Сколково, ул. Новая, д. 100

Рассмотрены проблемы восприятия цвета при светодиодном освещении. Показано, что неадекватное восприятие оператором цвета сигналов увеличивает риски транспортных происшествий. Наряду с трехцветной гипотезой Юнга–Гельмгольца рассмотрена современная гипотеза, основанная на волоконно-оптическом подходе к функционированию системы «клетки Мюллера – колбочки». Сделана попытка объяснить ряд эффектов кривой видности и временных задержек при определении цвета световых сигналов. Выполненные исследования по оценке влияния светодиодного освещения на функциональное состояние и работоспособность железнодорожников с использованием методик профессионального отбора выявили изменения негативного характера. Доказано снижение функциональной устойчивости к цветоразличению зеленого и красного сигналов, а также увеличение времени реагирования сложной зрительно-моторной реакции и значимом снижении готовности к экстремному действию (монотонноустойчивости) обследованных лиц. Приведены данные о временных особенностях определения цвета сигналов относительно красного сигнала (650 нм). Показано, что применение в сигнальных приборах светодиодов красного цвета с длиной волны намного менее чем 650 нм увеличивает риски неадекватного распознавания цвета и время реакции человека на запрещающий сигнал и возможность негативного исхода событий на транспорте и в жизни. Эти особенности должны учитываться при проектировании светофоров и других сигнальных приборов, обеспечивающих безопасность движения на транспорте. Показано, что сигнальные светофоры для транспортных систем должны проектироваться с учетом физиологии восприятия света зрительным анализатором человека, абсолютно исключая применение светодиодов с длиной волны менее 650 нм.

Ключевые слова: светодиодное освещение, цвет, светофоры, светодиоды, клетки Мюллера, колбочки, красный свет, волоконно-оптическая система глаза.

Природа разговаривает с человеком языком цвета окружающей среды. На первый взгляд, может показаться, что цвет – это очень просто. Но на самом деле цветовые сигналы несут определенную информацию и имеют огромное влияние на нашу жизнь, меняя настроение, эмоции, самочувствие. Порой цвет руководит самой жизнью – при неадекватном распознавании цвета предупреждающих и запрещающих сигналов на транспорте. Цвет – это язык нашей жизни. Мы не всегда умеем его переводить, но внутренне чувствуем и инстинктивно действуем по его законам. Наши реакции на цвет запрограммированы в наших генах, любовь к определенным цветам меняется в зависимости от давления внешнего мира и нашего ощущения себя.

Предмет зрения – видимое. В своих трудах Аристотель отмечал, что «...видимое есть цвет.

А цвет принадлежит к тому, что видимо само по себе; само по себе не в том смысле, что быть видимым – это существо его, а в том, что оно в самом себе заключает причину того, почему оно видимо. Всякий цвет есть то, что приводит в движение действительно прозрачное, и в этом – его природа. Вот почему нельзя видеть цвета без света, а всякий цвет каждого предмета видим при свете». В настоящее время среди офтальмологов и светотехников получила распространение парадигма, основанная на трехцветной гипотезе Юнга–Гельмгольца для описания модели распознавания цвета [6]. Согласно этой гипотезе для наилучшего распознавания цветное изображение должно быть сфокусировано в ямочку, в которой находится наибольшая плотность колбочек. Для этого зрачок глаза должен адекватно реагировать на спектр осве-

© Капцов В.А., Дейнего В.Н., 2017

Капцов Валерий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом гигиены труда (e-mail: karpovva39@mail.ru; тел.: 8 (499) 153-36-28).

Дейнего Виталий Николаевич – руководитель проекта по светотехнике (e-mail: aet@aetechnologies.ru; тел.: 8 (495) 280-76-07).

щения, в котором находится цветной предмет. При светодиодном освещении диаметр зрачка глаза раскрыт больше, чем при солнечном свете, что не обеспечивает 100%-ного распознавания цвета предмета [1–3, 5, 14–16].

Учитывая влияние спектра света светодиодов на функции глаза и здоровье машинистов, специалисты Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожной гигиены (ВНИИЖГ) Роспотребнадзора провели исследования по влиянию рассеянного светодиодного и люминесцентного света и света от штатных ламповых светильников на психофизиологическое состояние человека. Эти исследования выполнялись по заданию ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»). Рабочие места экспериментальной установки ВНИИЖГ и все светильники были аттестованы ведущими техническими специалистами ВНИИЖГ и ОАО «РЖД».

Выполненные исследования по оценке влияния светодиодного освещения на функциональное состояние и работоспособность железнодорожников с использованием утвержденных методик профессионального отбора выявили изменения негативного характера. Это выразилось в некотором снижении функциональной устойчивости к цветоразличению зеленого и красного сигналов, а также в увеличении времени реагирования сложной зрительно-моторной реакции и значимом снижении готовности к экстренному действию (монотонноустойчивости) обследованных лиц.

Специалисты Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» в своих исследованиях также отмечали, что у волонтеров в возрасте 20–25 лет ухудшалось свето- и цветовосприятие в конце проведенного исследования по оценке влияния светодиодного освещения на зрительный анализатор человека. Эта особенность важна для ряда профессий – хирургов, водителей авто- и мототранспорта, диспетчеров и машинистов поездов железных дорог, операторов атомных электростанций, а также специальных объектов Министерства обороны. Неадекватное распознавание цвета сигналов увеличивает риски возникновения нештатных ситуаций различной степени тяжести для человека и населения в целом (при авариях на атомных электростанциях). Поэтому проблема восприятия цвета световых сигналов является актуальной.

Для пешеходов и водителей городского транспорта вполне достаточно правильно реагировать на сигналы трех цветов: красного, желтого и зеленого. Железнодорожники должны правильно воспринимать и адекватно реагировать практически на весь цветовой спектр. Так, в «Инструкции по сигнализации на железных дорогах Российской Федерации» оговариваются следующие сигналы:

- один зеленый огонь – «Разрешается движение с установленной скоростью»;
- один желтый мигающий огонь – «Разрешается движение с установленной скоростью; следующий светофор открыт и требует проследования его с уменьшенной скоростью»;
- один желтый огонь – «Разрешается движение с готовностью остановиться; следующий светофор закрыт»;
- два желтых огня, из них верхний мигающий, – «Разрешается проследование светофора с уменьшенной скоростью; поезд следует с отклонением по стрелочному переводу; следующий светофор открыт»;
- два желтых огня – «Разрешается проследование светофора с уменьшенной скоростью и готовностью остановиться у следующего светофора; поезд следует с отклонением по стрелочному переводу»;
- один лунно-белый мигающий огонь разрешает поезду проследовать светофор с красным огнем (или погасшим) и продолжать движение до следующего светофора (или до предельного столбика при приеме на путь без выходного светофора) со скоростью не более 20 км/ч;
- один красный огонь – «Стоять! Запрещается проезжать сигнал».

Исследованиям восприятия цветных сигналов посвящено много работ [4, 8, 9]. В этих работах рассматриваются сигналы красного света с длиной волны значительно меньшей, чем 650 нм. На рис. 1 приведены координаты цветности красного цвета и длины волны от 610 до 700 нм.

В своей работе M.J. Flannagan, D.F. Blower и J.M. Devonshire [9] определяют красный свет с координатами цветности – 0,66; 0,34, это соответствует длине волны менее 610 нм (табл. 1, 2).

Ju. Luoma et al. [8] красный свет определяют с координатами цветности – 0,715; 0,283, это соответствует длине волны менее 636 нм. На рис. 2 представлены спектры источников света, которые применялись в исследованиях. В табл. 3 указаны фотометрические значения для светодиодных ламп.

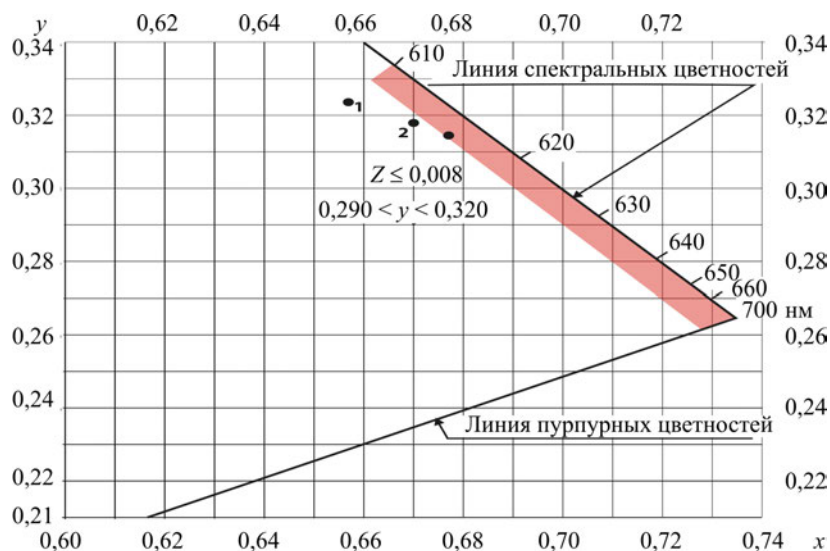


Рис. 1. Координаты цветности для красного цвета

Таблица 1

Средняя яркость ламп при соответствующих координатах цветности

Лампа	Яркость (cd)		Координаты цветности	
	без фильтра	с фильтром	X	Y
Сигнал поворота желтого цвета	130	30	0,57	0,43
Сигнал поворота красного цвета	130	79	0,66	0,34
Стоп-сигнал красного цвета (на уровне двигателя)	81		0,66	0,34
Стоп-сигнал красного цвета (выше уровня двигателя)	25		0,66	0,34

Таблица 2

Процентное соотношение быстрых и правильных ответов, а также медленных или неправильных ответов в зависимости от цвета сигналов, указанных в табл. 1

Содержание ответа	Цвет сигнала	
	красный	желтый
Быстрый и правильный ответ	89,8	95,9
Медленный или неправильный ответ	10,2	4,1

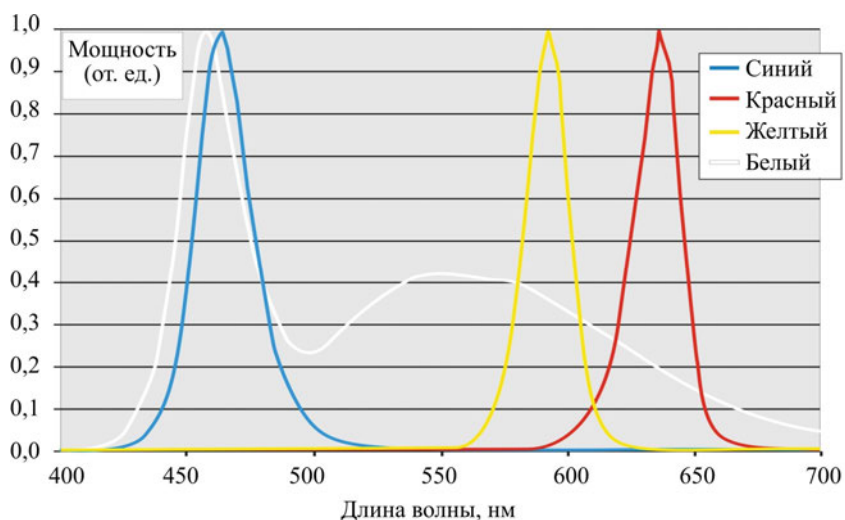


Рис. 2. Спектры синего, красного, желтого и белого светодиодов

Таблица 3

Фотометрические значения для светодиодных ламп

Цвет светодиода	S/P	Длина волны (нм)	Уровень интенсивности	Интенсивность света	
				при фотооптическом зрении (cd)	при скотопическом зрении (cd)
Синий	16,4	464	Высокий	1,444	23,617
			Низкий	604	9,878
Красный	0,069	636	Высокий	4,260	295
			Низкий	2,112	146
Желтый	0,246	592	Высокий	2,060	507
			Низкий	1,276	314
Белый	2,52	...	Высокий	5,988	15,107
			Низкий	2,320	5,53

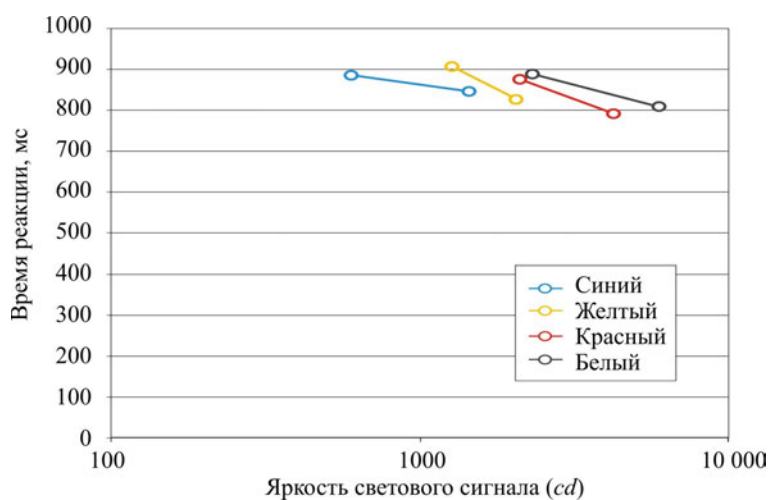


Рис. 3. Время реакции на световой сигнал

Минимальное время реакции регистрируется на красный свет с длиной волны 636 нм (рис. 3) [8].

Современные красные светодиоды с доминирующей длиной волны в спектре излучения 625–630 нм обладают световым потоком, в 2–3 раза большим, чем светодиоды с длиной волны 640–645 нм, но их координаты цветности не входят в существующую нормируемую область цветности (рис. 4) [4]. Изготовители красных светодиодов совместно с сотрудниками фотометрической лаборатории отдела охраны труда ВНИИЖТ пришли к выводу о необходимости исследования возможности расширения границ области цветности сигналов красного цвета для железнодорожных светофоров путем эксперимента по вероятности восприятия в качестве красного сигнала с координатами цветности, соответствующими красным светоизлучающим диодам (СИД) с доминирующей длиной волны 625–630 нм, в реальных условиях эксплуатации светофоров.

В ходе эксперимента ответы наблюдателя о цвете сигнала заносились в журнал в столбец, при этом цифра «1» означала желтый цвет,

а цифра «2» – красный [4]. В другом столбце фиксировалось время распознавания сигнала в секундах. В третьем – последовательность предъявляемой серии сигналов, где: цифра «1» означает желтый цвет с координатами цветности $x_1 = 0,612, y_1 = 0,385$; цифра «2» – красный цвет с координатами $x_2 = 0,703, y_2 = 0,297$; цифра «3» – красный цвет с координатами $x_3 = 0,713, y_3 = 0,287$ (табл. 4).

Из анализа представленных данных видно, что, приближая длину волны красного света к значениям 650 нм, увеличивается вероятность распознавания цвета и уменьшается время реакции на красный сигнал. Это важно учитывать при определении длины остановочного пути транспортного средства в различных погодных условиях. В светотехнике определены световые и цветовые пороги для источника света малых размеров (рис. 5).

Из данных соотношений светового и цветового порогов следует, что начиная с длины волны 650 нм и определенного уровня освещенности человек видит свет и одновременно определяет его цвет. Это труднообъяснимо, исходя из планарной гипотезы Юнга–Гельмгольца [6],

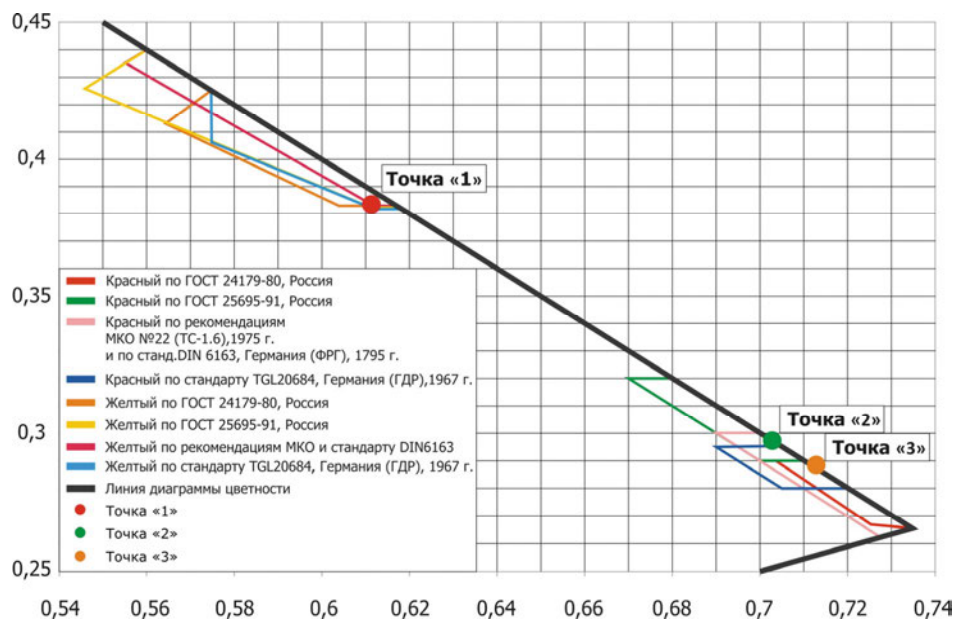


Рис. 4. Координаты цветности с областями цвета сигналов по нормативной документации различных стран

Таблица 4

Результаты эксперимента по распознаванию световых сигналов

Фон; яркость, кд/м ²	Небо, 5060÷17700			Зелень, 107÷640		
Номер точки исследуемой цветности	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
Количество предъявлений (<i>n</i>), шт.	867	866	867	205	208	207
Количество ошибок опознавания цвета, шт.	3	3	2	0	0	0
Вероятность правильного опознавания цвета (<i>P</i>)	0,9965	0,9966	0,9977	1,0	1,0	1,0
Среднее время опознавания (τ_{cp}), с	1,030	1,005	0,996	0,814	0,731	0,715
Оценка средней квадратической ошибки (<i>s</i>), с	0,237	0,251	0,242	0,199	0,167	0,124

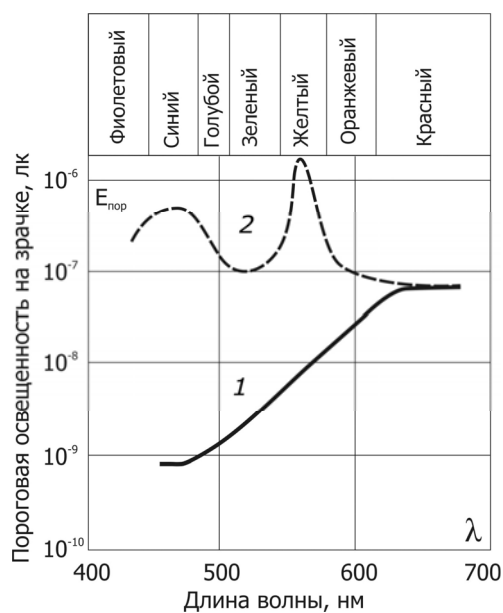


Рис. 5. Световой (1) и цветовой (2) пороги для источника света малых размеров

но наглядно объясняется при применении волоконно-оптического подхода к функционированию системы «клетка Мюллера – колбочка».

В 2007 г. исследователи под руководством Кристиана Франзе, сотрудника Кембриджского университета, обнаружили, что один вид глии сетчатки, известный как клетки Мюллера, функционирует в качестве оптических волокон, направляя свет к фоторецепторам. По-прежнему не было найдено ответа: как получилось, что эти природные оптические волокна поддерживают два вида фоторецепторов: палочки, которые функционируют в условиях слабого освещения, и колбочки, которые помогают нам видеть при ярком дневном свете.

Впервые они были описаны немецким анатомом Генрихом Мюллером (1820–1864). Особенностью Мюллеровских клеток является то, что они простираются от внутренней (граничит со стекловидным телом) до внешней пограничной мембраны. Тела клеток находятся во внутреннем зернистом слое. Потеря архитектоники клеток Мюллера имеет значение при отслоении сетчатки. Результаты исследования, проведенного в университете Лейпцига в 2007 г., показали, что клетки Мюллера обладают светопроводными функциями. Они собирают свет с передней поверхности сетчатки и проводят его к фоторецепторам, размещенным на ее задней поверхности, подобно оптоволоконному кабелю. Без клеток Мюллера свет будет попадать на фоторецепторы в рассеянном виде, что приведет к снижению остроты зрения. Исследователи как из университетов Лейпцига и Геттингена в Германии, так и из Universidade Central De Caribe Bayamon, Пуэрто-Рико, и Кембриджского университета в Великобритании обнаружили, как свет направляется на клетки Мюллера (рис. 6). Тем самым они скорректировали общепринятую оптическую систему зрительного анализатора. Клетки Мюллера функционируют в качестве оптических волокон, направляют и концентрируют желто-зеленый спектр света, к которому многие колбочки имеют максимальную чувствительность. Синий свет просачивается из клеток Мюллера, чтобы активировать палочки.

Желтое пятно из всего синего спектра вырезает волны с длиной волны 450–460 нм. Клетки Мюллера содержат фокус для сбора и приема рассеянного света от точки пространства, изменяя по длине коэффициент преломления света (рис. 7).

Ученые Израильского технологического института в Хайфе установили, что клетки Мюллера работают как оптическое волокно [13]. При

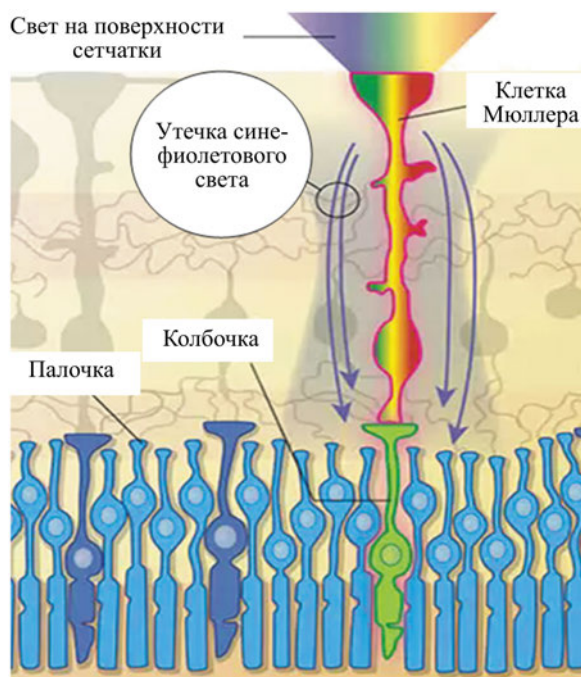


Рис. 6. Светопроводящая клетка Мюллера и утечка фиолетового и синего света

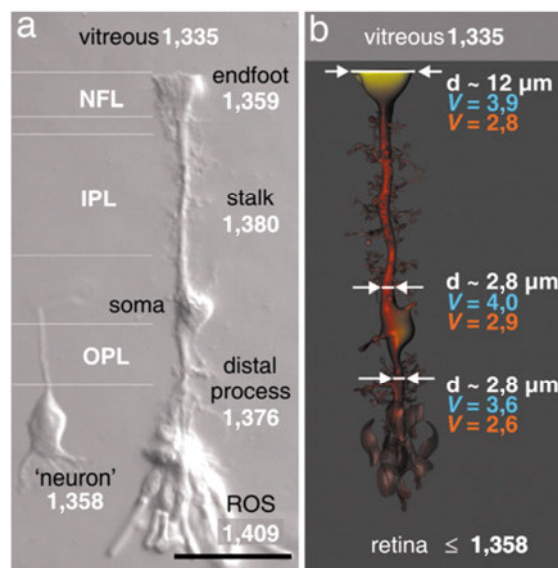


Рис. 7. Общий вид клетки Мюллера и распределение значений коэффициента преломления по ее длине [12]

этом клетки Мюллера, освещенные белым светом, пропускают длины волн в зелено-красной области для двух типов колбочек, а сине-фиолетовый свет просачивается через сетчатку, чтобы активировать палочки. В клетке Мюллера максимальная концентрация света отмечается в желто-зеленой части светового спектра при длине волны 560 нм [13].

Сотрудники университета под руководством Amichai Labin рассмотрели увеличенную

сетчатку морской свинки при конфокальной микроскопии и обнаружили, что каждая Мюллеровская клетка сочетается с индивидуальной колбочкой, и почти 90 % всех колбочек были связаны с этими клетками. Эффект оптического волокна может увеличить количество фотонов, достигающих одной колбочки, почти в 11 раз.

О колбочках и палочках написано много работ, но в них не рассматривалась оптическая схема попадания света на фоточувствительные опсины и его проникновение в тело клеток пигментного эпителия. Существуют гипотезы о принципах работы колбочек и палочек, внешних частей их мембраны, которые могут быть рассмотрены как физические аналоги волновода конической и цилиндрической формы в среде прозрачного тела глаза (жидкая среда) [10, 11]. Это дает возможность пересмотра традиционных взглядов на зрительный процесс. По Медейросу, внешняя доля мембраны колбочки может работать как конический волновод [11]. Широкое сечение конуса встречает входящие лучи, которые воспринимаются мембраной как конусным волноводом в жидкой среде прозрачного тела глаза (жидкая среда глаза). В этой среде порядок фокусировки лучей противоположен порядку фокусировки лучей в оптической системе в воздухе (согласно хроматической аберрации они фокусируются в зависимости от длины волны). Их фокусировка до входа в мембрану и вход в нее противоположны, что регулируется спецификой работы конической формы мембраны – как конического волновода в составе колбочки, где стенки обладают различной отражательной способностью и разными показателями преломления, что определяет порядок входа лучей: красных → зеленых → синих (для системы трихроматизма цветного зрения), например, у приматов и человека (рис. 8).

В работе приведены результаты моделирования распределения спектра света по длине оптического конуса и по оптически прозрачным стенкам колбочки. Спектральные характеристики клеток Мюллера хорошо коррелируют с кривой видности глаза (рис. 9, 10) [11]. Исследования в этом направлении продолжаются.

Данный подход наглядно показывает, как свет попадает на наружные сегменты палочек и колбочек и в тело клеток пигментного эпителия, а также эта модель позволяет оценить восприятие цветов различных сигналов и частности по времени задержки распознавания.

Оценка времени задержки восприятия света очень важна для водителей автотранспорта и машинистов поездов. Существуют экспериментальные результаты для задержки времени (в миллисекундах), которые могут быть выражены для

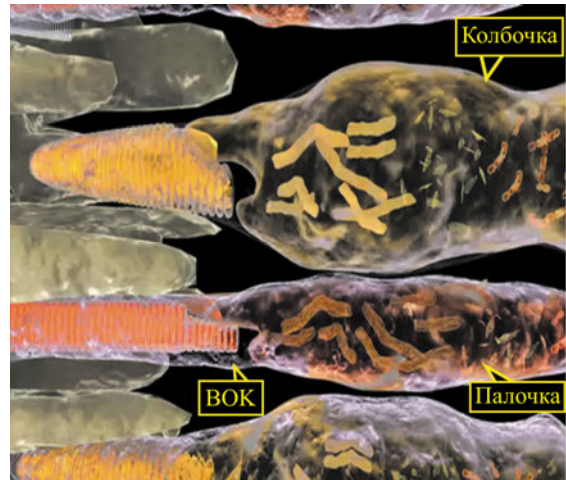


Рис. 8. Строение палочек и колбочек с указанием волоконно-оптического клина (ВОК) [7]

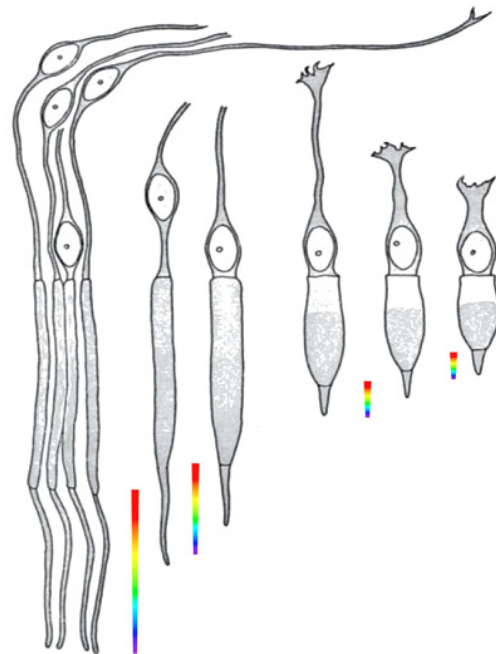


Рис. 9. Формы прохождения спектра света через сетчатку

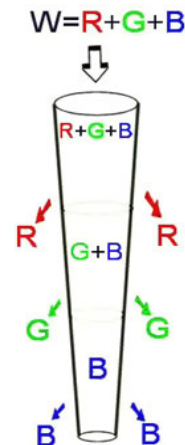


Рис. 10. Работа клиновидного волокна как волновода лучей спектра света

любой длины волны, λ (в миллимикронах), относительно перцепционной задержки 650 нм красного света, что приблизительно может быть:

$$T_{\text{задержка}} (\text{мс}) = 97,5 - 0,15 \lambda (\text{нм}).$$

Это дает нулевую задержку (мс) для красного света 650 нм и может составлять задержку до 30 мс для самой короткой длины волны света. Данные показывают, что существует временная дисперсия (задержка) между синим и красным светом. Например, голубой (450 нм) свет воспринимается с задержкой около 30 мс от красного (650 нм) света.

Систематизация новых знаний о восприятии цвета по 3D-системе «клетка Мюллера–колбочка» позволяет уточнить накопленные знания по планарной трехцветной гипотезе Юнга–Гельмгольца в части спектрального разложения белого света и временных задержек по восприятию красного, зеленого и синего света. Это имеет огромное прикладное значение для обеспечения безопасности движения и снижения негативного влияния окружающей среды на здоровье человека.

По фактам проезда под красный сигнал принимаются соответствующие административные меры, кроме тех, которые обеспечивают 100%-ное распознавание красного сигнала с учетом строения глаза человека.

Например, для железнодорожного транспорта причины подробно изложены в «Памятке для локомотивной бригады по предупреждению проездов светофоров с запрещающим показанием», которая утверждена 11 января 2011 г.

При увеличении скорости движения с 40 до 80 км/ч время реакции машиниста возрастает почти в 2 раза, а ведь многие из них ведут поезд со скоростью 100 км/ч и более и постоянно находятся в напряжении.

В ночной период время реакции возрастает почти в 2 раза по сравнению со среднесуточным уровнем. Кроме того, его увеличению в 1,3 раза способствует последствие алкоголя и примерно настолько же – условия работы на тепловозе.

Более чем вековые наблюдения врачей подтверждают, что курение неблагоприятно влияет на зрение. Под воздействием токсичных веществ, содержащихся в табачном дыме, у заядлых курильщиков нередко возникает табачная амблиопия, которая способствует ослаблению восприятия красного цвета, снижению остроты зрения, появлению пятен в поле зрения. А это все недопустимо для машиниста по условиям обеспечения безопасности движения.

В данной статье не рассматривается механизм ослепления за счет изменения оптической геометрии клеток Мюллера при избыточной дозе света (красного, синего), хотя хорошо известно, что ослепление увеличивает время реакции в два раза и более. Эта проблема будет рассмотрена позднее.

Выводы:

1. В условиях светодиодного освещения высоки риски неадекватного определения цвета, что увеличивает вероятность негативного исхода для водителей транспортных средств.

2. Волоконно-оптический подход к функционированию колбочек наглядно объясняет, почему красный цвет (650 нм) сигнала определяется одновременно с ощущением света.

3. Сигнальные светофоры для транспортных систем должны проектироваться с учетом физиологии восприятия света зрительным анализатором человека, абсолютно исключая применение светодиодов с длиной волны менее 650 нм.

Список литературы

1. Бакуткин В.В., Киричук В.Ф., Кузнецова Э.В. Влияние динамической электронной стимуляции на аккомодационные способности глаза человека // Проблемы оптической физики и биофотоники: материалы XIII Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов: Новый ветер, 2009. – 219 с.
2. Берман С.М., Клиер Р.Д. Недавно открытый фоторецептор человека и предыдущие исследования в области зрения // Светотехника. – 2008. – № 3. – С. 49–53.
3. Дайнего В.Н., Иванов В.Ф. Радуга цветов изоляции проводов в свете светодиодного освещения [Электронный ресурс] // Кабель-news. – 2013. – № 2. – URL: http://www.ruscable.ru/article/Raduga_cvetov_izolyacii_provodov_v_sвете_svetodiodnogo_osveshheniya (дата обращения: 18.06.2016).
4. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светоизлучающих диодов / Д.Р. Агафонов, М.А. Мурашова, С.Г. Никифоров, О.П. Пинчук, Р.И. Столяревская [Электронный ресурс] // Светотехника. – 2003. – № 6. – URL: www.led-e.ru/assets/files/pdf/Svetodiod-svetofor.pdf (дата обращения: 22.09.2016).
5. Клиническая анатомия органа зрения: части цилиарного тела [Электронный ресурс] // StudFiles: файловый архив студентов. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/2243441/page:7/> (дата обращения: 15.10.2016).
6. Теория Юнг–Гельмгольца [Электронный ресурс] // Справочник химика 21: химия и химическая технология. – URL: <http://chem21.info/info/279269/> (дата обращения: 03.07.2016).

7. 3d rods cones eye anatomy with bipolar pigmented amacrine horizontal cells epithelium optic nerve and cell nucleus body human medical [Электронный ресурс] // TurboSquid. – URL: <http://www.turbosquid.com/3d-models/max-rods-cones-eye-anatomy/570819> (дата обращения: 08.10.2016).
8. Effects of turn-signal color on reaction times to brake signals / Ju. Luoma, M.J. Flannagan, M. Sivak, M. Aoki, E.C. Traube. – Michigan, 1995. – 19 p.
9. Flannagan M.J., Blower D.F., Devonshire J.M. Effects of Warning Lamp Color and Intensity on Driver Vision: Report of work on Non-Blinding Emergency Vehicle Lighting (NBEVL). – Michigan, 2008. – 54 p.
10. Huth G.C. A Modern Explanation for Light Interaction with the Retina of the Eye Based on Nanostructural Geometry: Rethinking the Vision Process [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ghuth.com/> (дата обращения: 21.07.2016).
11. Medeiros J.A. The Cone Spectrometer Model (CSM) [Электронный ресурс] // Color Vision: A New Understanding. – URL: http://conesandcolor.net/_F_CSM.htm (дата обращения: 22.10.2016).
12. Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina / K. Franze, J. Grosche, S.N. Skatchkov, S. Schinkinger, Ch. Foja, D. Schild, O. Uckermann, K. Travis, A. Reichenbach, J. Guck // PNAS. – 2007. – Vol. 104, № 20. – P. 8287–8292. DOI: 10.1073/pnas.0611180104.
13. Müller cells separate between wavelengths to improve day vision with minimal effect upon night vision [Электронный ресурс] / A.M. Labin, Sh.K. Safuri, E.N. Ribak, I. Perlman // Nature Communications. – 2014. – № 4319. – URL: <http://www.nature.com/articles/ncomms5319> (дата обращения: 16.08.2016) DOI: 10.1038/ncomms5319
14. Navarro R., Santamaría J., Bescós J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics // Journal of the Optical Society of America A. – 1985. – Vol. 2, № 8. – P. 1273–1280. DOI: 10.1364/JOSAA.2.001273.
15. Plainis S., Ginis H.S., Pallikaris A. The effect of ocular aberrations on steady-state errors of accommodative response // J.Vis. – 2005. – Vol. 5, № 7. – P. 466–477.
16. Tarrant J., Roorda A., Wildsoet C.F. Determining the accommodative response from wavefront aberrations // Journal of Vision. – 2010. – Vol. 10, № 5. – P. 4.

Капцов В.А., Дейнего В.Н. Восприятие цвета при светодиодном освещении – риски здоровью // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 2. – С. 16–25. DOI: 10.21668/health.risk/2017.2.02

UDC 614/5: 644.36

DOI: 10.21668/health.risk/2017.2.02.eng

HEALTH RISKS OCCURRING WHEN COLOR IS PERCEPTED UNDER LED LIGHTING

V.A. Kaptsov¹, V.N. Deinego²

¹All-Russian Research Institute of Railway Hygiene, 1 Pakgauznoe Shosse Str., Bldg. 1, Moscow, 125438, Russian Federation

²New energy technologies, 100 Novaya Str., Skolkovo, Moscow region, 143025, Russian Federation

The article deals with problems of color perception under LED lighting. We revealed that inadequate perception of a signal color by a driver led to greater risks of transport accidents. We reviewed both Jung-Helmholtz three-color hypothesis and a modern one based on fiber-optical approach to functioning of "Mueller cells and cones" system. We made an attempt to explain a number of effects related to visibility curves and time delays when defining color of light signals. Our research on assessing influence exerted by LED lighting on functional state and working capacity of railway workers during which we applied occupational selection techniques revealed negative changes. We proved there was a decrease in functional resistance to color sense between red and green signals as well as longer response time for complicated sight-motor reaction and significant decrease in readiness to emergency actions (resistance to monotony) in examined individuals. The article also contains data on time peculiarities which are characteristic for defining signals color in relation to red signal (650 nm). We showed that when red color LEDs with wave length much shorter than 650 nm were used in signaling devices it caused risks of inadequate color detection, longer reaction to inhibiting signals, and greater possibility of transport accidents and negative events in everyday life. These peculiarities should be taken into account when designing traffic lights and other signaling devices which provide transport safety. We also proved that signaling traffic lights for transport systems should be designed allowing for physiology of color perception by a human visual analyzer; application of LEDs with wave length shorter than 650 nm should be absolutely excluded.

Key words: LED lighting, color, traffic lights, LEDs, Mueller cells, cones, red light, fiber-optical eye system.

© Kaptsov V.A., Deinego V.N., 2017

Valeriy A. Kaptsov – Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, prof., Head of the Occupational Health Department (e-mail: kapcovva39@mail.ru; tel.: + 7 (499) 153-36-28).

Vitaly N. Deinego – Light technique project manager (e-mail: aet@aetechnologies.ru; tel.: + 7 (495) 280-76-07).

References

1. Bakutkin V.V., Kirichuk V.F., Kuznetsova E.V. Vliyanie dinamicheskoi elektroneirostimulyatsii na akkomodatsionnye sposobnosti glaza cheloveka [Influence exerted by dynamic electric neurostimulation on accommodation abilities of a human eye]. *Problemy opticheskoi fiziki i biofotoniki: materialy XIII Mezhdunar. molodezhnoi nauchnoi shkoly po optike, lazernoi fizike i biofotonike [Issues of optical physics and biophotonics: materials of the XIII International youth scientific schools on optics, laser physics and biophotonics]*. Saratov, Novyi veter Publ., 2009, 219 p. (in Russian).
2. Berman S.M., Klier R.D. Nedavno otkrytyi fotoretseptor cheloveka i predydushchie issledovaniya v oblasti zreniya [Recently discovered human photoreceptor and previous research in the sphere of human sight]. *Svetotekhnika*, 2008, no. 3, pp. 49–53 (in Russian).
3. Deinego V.N., Ivanov V.F. Raduga cvetov izoljatsii provodov v svete svetodiodnogo osveshheniya [Rainbow of wire insulation colors under LED lighting]. *KABEL-news*, 2013, no. 2. Available at: http://www.ruscable.ru/article/Raduga_cvetov_izolyatsii_provodov_v_sвете_svetodiodnogo_osveshheniya (18.06.2016) (in Russian).
4. Agafonov D.R., Murashova M.A., Nikiforov S.G., Pinchuk O.P., Stoljarevskaja R.I. Issledovaniya vizual'nogo vosprijatija krasnyh zhelezodorozhnyh svetoforov na osnove svetoizluchajushhih diodov [Research on visual perception of red railway traffic lights based on LEDs]. *Svetotekhnika*, 2003. Available at: www.led-e.ru/assets/files/pdf/Svetodiod-svetofor.pdf (22.09.2016) (in Russian).
5. Klinicheskaya anatomiya organa zreniya: chasti tsiliarnogo tela [Clinical anatomy of a sight organ: ciliary body parts]. *StudFiles: failovyi arkhiv studentov*. Available at: <http://www.studfiles.ru/preview/2243441/page:7/> (15.10.2016) (in Russian).
6. Teoriya Yung-Gel'mgol'tsa [Jung-Helmholtz theory]. *Spravochnik khimika 21: khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. Available at: <http://chem21.info/info/279269/> (03.07.2016) (in Russian).
7. 3d rods cones eye anatomy with bipolar pigmented amacrine horizontal cells epithelium optic nerve and cell nucleus body human medical. *TurboSquid*. Available at: <http://www.turbosquid.com/3d-models/max-rods-cones-eye-anatomy/570819> (08.10.2016)
8. Flannagan M.J., Blower D.F., Devonshire J.M. Effects of Warning Lamp Color and Intensity on Driver Vision: Report of work on Non-Blinding Emergency Vehicle Lighting (NBEVL). Michigan, 2008, 54 p.
9. Franze K., Grosche J., Skatchkov S.N., Schinkinger S., Ch. Foja, D.Schild, O.Uckermann, K.Travis, A.Reichenbach, J.Guck.Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina. *PNAS*, 2007, vol. 104, no. 20, pp. 8287–8292. DOI: 10.1073/pnas.0611180104.
10. Huth G.C. A Modern Explanation for Light Interaction with the Retina of the Eye Based on Nanostructural Geometry: Rethinking the Vision Process. Available at: <http://www.ghuth.com/> (21.07.2016).
11. Labin A.M., Safuri Sh.K., Ribak E.N., Perlman I. Müller cells separate between wavelengths to improve day vision with minimal effect upon night vision. *Nature Communications*, 2014, no. 4319. DOI: 10.1038/ncomms5319
12. Luoma Ju., Flannagan M.J., Sivak M., Aoki M., Traube E.C. Effects of turn-signal color on reaction times to brake signals. Michigan, 1995, 19 p.
13. Medeiros J.A. The Cone Spectrometer Model (CSM). *Color Vision: A New Understanding*. Available at: http://conesandcolor.net/_F_CSM.htm (22.10.2016)
14. Navarro R., Santamaria J., Bescós J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, vol. 2, no. 8, pp. 1273–1280. DOI: 10.1364/JOSAA.2.001273.
15. Plainis S., Ginis H.S., Pallikaris A. The effect of ocular aberrations on steady-state errors of accommodative response. *J.Vis*, 2005, vol. 5, no. 7, pp. 466–477.
16. Tarrant J., Roorda A., Wildsoet C.F. Determining the accommodative response from wavefront aberrations. *Journal of Vision*, 2010, vol. 10, no 5, pp. 4.

Kaptsov V.A., Deinego V.N. Health risks occurring when color is perceived under led lighting. Health Risk Analysis, 2017, no. 2, pp.16–25. DOI: 10.21668/health.risk/2017.2.02.eng

Получена: 10.03.2017

Принята: 16.05.2017

Опубликована: 30.06.2017