

# Влияние факторов окружающей среды на здоровье

© В. Н. ДЕЙНЕГО, В. А. КАПЦОВ, 2013

УДК 613.5:644.36

В. Н. Дейнего<sup>1</sup>, В. А. Капцов<sup>2</sup>

## СВЕТ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ И СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

<sup>1</sup>ООО «Новые энергетические технологии», 143025, «Технопарк «Сколково», Московская обл., дер. Сколково; <sup>2</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены» Роспотребнадзора, 125438, Москва

*Появление новых высокоинтенсивных источников с большой долей синего света в спектре выявило новые риски их влияния на функции глаза и здоровье человека, особенно детей и подростков. Назрела необходимость пересмотра методов исследований гигиены зрения в условиях освещения энергосберегающими и светодиодными лампами. На основании системного подхода и знаний о вновь открытых фоточувствительных рецепторах была построена иерархическая модель взаимодействия «световая среда – глаз – система формирования зрительных образов – гормональная система человека – психофизиологическое его состояние». Такой подход позволил разработать номенклатуру рисков негативного влияния спектра на функции глаза и здоровье человека, а также сформулировать гигиенические требования к высокоинтенсивным энергосберегающим источникам света.*

**Ключевые слова:** гигиена зрения; энергосберегающие лампы; светодиоды; меланопсин; мелатонин; криптохром.

V. N. Deynego<sup>1</sup>, V. A. Kapsov<sup>2</sup> – ENERGY SAVING AND LED LAMP LIGHTING AND HUMAN HEALTH

<sup>1</sup>New Energy Technologies”, Technopark “Skolkovo”, Skolkovo, Moscow region, Russian Federation, 143025; <sup>2</sup>The All-Russian Research Institute of Railway Hygiene, Moscow, Russian Federation, 125438

*The appearance of new sources of high-intensity with large proportion of blue light in the spectrum revealed new risks of their influence on the function of the eye and human health, especially for children and teenagers. There is an urgent need to reconsider the research methods of vision hygiene in conditions of energy-saving and LED bulbs lighting. On the basis of a systematic approach and knowledge of the newly discovered photosensitive receptors there was built hierarchical model of the interaction of “light environment - the eye - the system of formation of visual images - the hormonal system of the person - his psycho-physiological state.” This approach allowed us to develop a range of risk for the negative impact of spectrum on the functions of the eye and human health, as well as to formulate the hygiene requirements for energy-efficient high-intensity light sources.*

**Key words:** vision hygiene; energy saving lamps; LEDs; melanopsin; melatonin; cryptochrome.

Здоровье населения – один из показателей, определяющих экономический, интеллектуальный и культурный потенциал страны. Статья 41 Конституции РФ гласит: «Каждый имеет право на охрану здоровья», которое в значительной степени зависит от качества воды, продуктов питания, воздуха и света. Влияние качества света на здоровье и глаза человека хорошо изучено в рамках классических моделей восприятия света от таких источников, как солнце, лампы накаливания, галогенные лампы. Последние исследования влияния света новых энергосберегающих источников на здоровье человека показали, что освещение из проблемы чисто гигиенической стало проблемой социально-экономической [1, 2]. Одним из важных аспектов гигиенической науки является обеспечение гармонического равновесия между воздействием факторов внешней среды и функциональным состоянием организма человека.

В преддверии массового внедрения новых люминесцентных энергосберегающих и светодиодных источников света и исполнения Федерального закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ «О энергосбережении» специалисты Международной ассоциации «Метро» провели сбор и анализ информации о воздействии света на функции глаза и здоровье сотрудников метрополитена и пассажи-

ров [2]. Результаты этой работы легли в основу обращений в Роспотребнадзор и Правительство РФ.

В 2010 г. специалисты Роснано-технологии совместно со специалистами НИИ гигиены и охраны здоровья детей и подростков НИЦЗД РАМН провели комплекс исследований по влиянию светодиодного освещения на детей и подростков. Критерием гигиенической оценки служила динамика психофункционального состояния добровольцев-волонтеров при работе со значительной зрительной и умственной нагрузкой в условиях общего освещения, с использованием светодиодов и люминесцентных ламп. Оценивались два типа светодиодных светильников – с рассеивателем и без него – по рекомендациям НИИ СФ РАН. Основные результаты эксперимента, проведенного Научным центром здоровья детей РАМН, показали, что при использовании светодиодного светильника Beta Lux 1-30 работоспособность повысилась на 12%, а утомляемость не превышала показателей контрольной группы. В то же время эти же исследователи обнаружили, что при освещении светильником, изготовленным по рекомендации НИИ СФ, работоспособность и утомляемость волонтеров ухудшалась в 2 раза. Несмотря на то, что светильники этого типа занимают большую часть рынка светодиодных светильников (более 87%), результаты их испытаний не были использованы при подготовке нормативных документов. Сегодня в Европе широко обсуждается документ Научного комитета по новым и вновь выявленным рискам для здо-

**Для корреспонденции:** Капцов Валерий Александрович, карcovva@rambler.ru

ровья (SCENIHR) «Медицинские аспекты последствия искусственного света» [3]. Европейский Союз выпустил Зеленую книгу под названием «Освещение будущего: ускорение развертывания инновационных технологий освещения», в которой отмечается:

• раздел 2.2. – «государства несут ответственность за безопасность светодиодной продукции, продаваемой на светотехническом рынке Европы».

В подразделе «Проблемы биологической безопасности («синий свет опасности»)» эта проблема поднята в связи с воздействием на сетчатку глаза человека большой доли синего в общем спектре белого светодиода. Предварительные рекомендации Научного комитета по новым и вновь выявленным рискам для здоровья следующие: «рассмотреть меры по уменьшению злоупотребления искусственным освещением в целом».

Учитывая влияние спектра светодиодов на функции глаза и здоровье машинистов, специалисты ВНИИЖГ провели исследования по влиянию светодиодного света и света от штатных ламповых светильников на их психофизиологическое состояние. Обобщенные результаты этих исследований переключаются с оценками дискомфорта, полученными в США при исследовании воздействия света на глаза водителей.

Проведенные исследования обозначают проблему, но не вскрывают глубинные причинно-следственные связи воздействия синего света на функции глаза и здоровье человека. Французское агентство ANSES по продовольственной, экологической безопасности и гигиене труда опубликовало доклад «Системы освещения с использованием светодиодов: здоровье? вопросы для рассмотрения». В нем отмечено, что фотобиологический стандарт безопасности (EN 62471) плохо приспособлен к системам освещения светодиодами. Этот стандарт построен по модели «световая среда – сетчатка глаза». При этом сетчатка рассматривалась как общая интегральная биосреда, подвергающаяся световой радиации. Учитывая эти особенности стандарта EN 62471 и опыт ранее проведенных исследований, была отработана методология исследования влияния света энергосберегающих источников света на функции глаза и здоровье человека, в основу которой легли следующие принципы:

- глаза человека – это часть мозга, вынесенная на периферию;
- имеет место эффект накопления поражений от воз-

действия свободных радикалов, образующихся под воздействием синей части спектра света;

- фоточувствительные клетки глаз связаны с системой гипоталамус – гипофиз и гипоталамус – эпифиз;
- все процессы, происходящие в организме человека, находят свой отклик в биофизическом состоянии систем глаза;
- через глаза спектр света в той или иной мере воздействует на все процессы, происходящие в организме человека;
- дефекты зрительной системы могут компенсироваться системой формирования зрительного образа.

С учетом этих принципов и последних открытий в области строения сетчатки глаза представлены модели восприятия света и его влияния на здоровье человека (табл. 1).

Все вышеперечисленные модели использовались нами для оценки воздействия спектра энергосберегающих и светодиодных ламп на функции глаза и здоровье человека.

В этих моделях одним из центральных показателей является диаметр зрачка глаза. Он характеризует оптимальную освещенность сетчатки и ее энергетическую освещенность, которая определяется по формуле:

$$E_r = L_s \cdot \tau \cdot d_e^2 / (4 \cdot f^2),$$

где  $E_r$  – энергетическая освещенность на сетчатке, Вт/м<sup>2</sup>;  $L_s$  – энергетическая яркость, ИИ Вт/(ср·м<sup>2</sup>);  $\tau$  – коэффициент пропускания глазных сред (стекловидного тела);  $d_e$  – диаметр зрачка;  $f$  – эффективное фокусное расстояние глаза.

Поэтому управление зрачком глаза должно быть адекватно поражающей дозе синего света в спектре. Чем больше доза синего в спектре, тем меньше должен быть диаметр зрачка. В таблице 2 приведены результаты измерений диаметра зрачка глаз операторов в ходе комплекса гигиенических, физиологических, офтальмо-эргономических и светотехнических исследований в помещениях и на отдельных рабочих местах операторов БЩУ Трипольской ГРЭС. В исследованиях принимали участие 32 оператора в возрасте 25–55 лет со стажем работы 6–26 лет.

Эти особенности изменения размера зрачка глаза необходимо учитывать при оценке фотобиологической безопасности источника света и его влияния на глаза и здоровье человека. Управление диаметром зрачка и

Таблица 1

Модели восприятия света

Модель восприятия света	Характеристика спектра света от светодиодов	Последствия воздействия света
RGB-модель (модель цветного зрения)	Низкий коэффициент цветопередачи из-за большой дозы синего света в общем спектре света	Неадекватное формирование матрицы цветопередачи
Модель поражения сетчатки свободными радикалами	Большая доза синего света в общем спектре света	Поражение сетчатки от окислительного стресса при воздействии накопленной дозы синего света
Меланопсиновая модель	Большой выброс синего света на 460 нм в общем спектре света	Подавление выработки мелатонина. Накопление дефицита мелатонина Выброс кортизола
Криптохромная модель	Провал в спектре на 480 нм, которого нет в солнечном спектре	Неадекватное управление диаметром зрачка глаза по отношению к управлению при солнечном свете
	Большая доза синего света на 440 нм	Управление сезонными биологическими часами
Модель деградации стекло-видного тела	Наличие пульсирующего магнитного поля в среде обитания	Повышение чувствительности к выбросам магнитного поля
	RGB-подсветка монитора	Появление в стекловидном теле эффекта «мушек»

Таблица 2

**Показатели изменения параметра зрачка у операторов блочных щитов управления электростанций в динамике трех рабочих смен при люминесцентном освещении лампами типа ЛБ-40\***

Рабочие смены	Первая смена			Вторая смена			Третья смена		
	8 часов	12 часов	16 часов	16 часов	20 часов	24 часа	24 часа	4 часа	8 часов
Диаметр зрачка глаза оператора, мм	3,6	5,1	6,4	4,9	6	6,7	4,5	5,5	6,1

\*По данным В. Г. Мартиросова, Институт медицины труда АМН Украины.

Таблица 3

**Результаты анализа спектров распространенных источников света в диапазоне 460–480 нм**

Источник света	Амплитуда воздействия на 480 нм	Качественная оценка диаметра зрачка от уровня воздействия	Требуемый уровень освещенности по нормам СН245-63* (люкс)	Качественная оценка характера изменения амплитуды в диапазоне 460–480нм
Солнечный день	$7,5 \times 10^{-2}$	Меньше, чем от света ЛЛ	Значительно больше 1000	Уровни амплитуд соизмеримы
Люминесцентная лампа	$5 \times 10^{-2}$	Меньше, чем от света ЛН	150–500	Восходящая (или уровни амплитуд соизмеримы)
Лампа накаливания	$7,5 \times 10^{-2}$	Больше, чем от света ЛЛ	75–300	Восходящая
Светодиодная лампа**	$5 \times 10^{-4}$	От М1 Вm3b+ нет адекватного сигнала на закрытие зрачка	Безосновательно распространены нормы для ЛЛ	Резко спадающая
Энергосберегающая лампа	Намного меньше, чем $5 \times 10^{-4}$			

\*Требуемые уровни освещенности для ламп накаливания и люминесцентных ламп взяты из СН 245-63. Эти источники света имеют разные спектры и, как следствие, разные требуемые уровни освещенности. \*\*«...При светодиодном свете зрачок расширен больше, чем при аналогичном освещении солнечным светом, – сетчатка получит более высокую дозу энергии синего цвета» [11].

«желтое пятно» являются естественной защитой от сильной части спектра рассеянного солнечного света.

Светодиоды белого света представляют опасность и для сетчатки глаза человека, так как высокоинтенсивный точечный источник света содержит большую долю синего света в своем спектре. Избыточное излучение в синей области спектра может приводить к фотохимическому повреждению сетчатки глаза [4, 5]. В реальных условиях эксплуатации белых светодиодов доля синего растет. На этот процесс обращается особое внимание в отчете ANSES: «Производители должны также принимать во внимание прогрессирующий износ слоев люминофора у белых светодиодов, который со временем может привести к перемещению устройства из одной фотобиологической группы риска в более высокую группу риска».

Модели биохимического поражения сетчатки глаза от дозы синего света рассмотрены в трудах М. А. Островского и П. П. Зака и экспериментально подтверждены на белых мышках при облучении их глаз белыми светодиодами фирмы «Nichia» [6, 7, 8]. Согласно полученным данным, существует корреляция между интенсивностью, спектральным составом света и развитием ряда глазных заболеваний.

В настоящее время проводятся исследования моделей восприятия света меланопсином, который содержится в ганглиозных клетках сетчатки глаза. Эти клетки имеют большое разнообразие типов. В настоящее время изучены ганглиозные клетки с меланопсином типа М1. Установлено, что меланопсин М1 Вm3b+ влияет на центр управления зрачком, а М1 Вm3b- на центр управления мелатонином и биологическими часами человека. При этом меланопсины разного типа имеют свои области максимальной фоточувствительности: для М1 Вm3b- на 460 нм, для М1 Вm3b+ на 480 нм. Синий свет через ганглиозные клетки и центры гипоталамуса воздействует на эпифиз, в котором синтезируется мелатонин, далее на гипофиз и надпочечники, которые вырабатывают кортизол и более 50 различных стероидных гормонов.

В Европе были проведены исследования [9] по

утреннему пробуждению детей синим светом (время облучения 1 час). Они показали, что это приводит к значительному выбросу кортизола, который в 2 и более раза превышает естественную норму, и к эффекту «зависимости» от синего света. Крупнейшие американские эпидемиологические исследования показывают, что ежедневное дополнительное воздействие синего света на глаза молодого человека в подростковом возрасте к тридцати годам может вызвать дегенерацию сетчатки (AMD), на 10 лет раньше, чем от естественного света, что в 2 раза увеличивает вероятность стать слепым. Дополнительное и неконтролируемое воздействие синим светом на гормональную систему человека, которая создает его индивидуальный гормональный фон, может иметь непредсказуемые последствия как для человека, так и для популяции в целом. Особенно опасна такая гормональная разбалансировка для детей и подростков.

Модель восприятия света с учетом белка криптозола позволила объяснить ряд эффектов воздействия на человека света от энергосберегающих ламп, таких как возникновение «синей вуали» и головная боль [10]. При этом происходит взаимодействие в цепи «белок криптохром (плюс синглетный кислород) – гипоталамус – гипофиз – надпочечник». Важно отметить, что синглетный кислород  $O_2^-$  обладает парамагнитными свойствами. При высокой чувствительности этой связки (белок +  $O_2^-$ ) может возникнуть метеозависимость человека и проявиться эффект «ложного стресса» при аномальных возмущениях магнитного поля окружающей среды. При освещении светом видимого диапазона спектра с плотностью мощности облучения  $0,001 \text{ Вт/см}^2$  за одну секунду в каждой клетке образуется примерно 1000 молекул синглетного кислорода. Синглетный кислород, обладая высокой химической, биологической активностью и парамагнитными свойствами, может привести к повреждению клеток.

Известно, что стекловидное тело глаза на 98–99% состоит из воды, которая находится в связи с отрицательно заряженной гиалуроновой кислотой. При возникно-

вении деградиционных процессов в стекловидном теле могут образовываться «глазные мушки». Чаще всего эти жалобы предъявляли люди после работы на LCD-мониторах с светодиодной RGB-подсветкой, разрушающей стекловидное тело.

В результате изучения приведенных выше моделей можно заключить, что свет длиной волны: 440 нм – воздействует на белок криптохром, 450–460 нм – вызывает окислительный стресс сетчатки, 460 нм и 480 нм – через меланопсин ганглиозных клеток сетчатки глаз управляют гормональной системой и диаметром зрачка соответственно.

Эти процессы и есть новые риски, которые требуют тщательного изучения и последующего нормирования для гигиенической оценки спектров новых энергосберегающих источников света.

Результаты анализа спектров распространенных источников света в диапазоне 460 нм и 480 нм приведены в таблице 3.

Необходимо отметить, что энергосберегающие и светодиодные лампы имеют резкий спад (большой провал) в спектре на 480 нм. Из представленных в таблице 3 данных видно, что в диапазоне максимальной чувствительности меланопсина, 460–480 нм, спектральные характеристики светодиодных ламп и ламп накаливания пересекаются, образуя крест, который назван «меланопсиновым крестом». Основное соотношение эффекта «меланопсиновый крест» можно представить как неравенство вида:

$$I_{460\text{нм}} \leq I_{480\text{нм}}$$

где  $I_{460\text{нм}}$  – амплитуда яркости при 460 нм;  $I_{480\text{нм}}$  – амплитуда яркости при 480 нм.

Управление диаметром зрачка при воздействии солнечного света является адекватным. При этом соблюдается соотношение «меланопсиновый крест». При большой дозе синего в спектре меланопсин M1 Brn3b+ формирует сигнал на уменьшение диаметра зрачка. Тем самым уменьшает энергетическую освещенность сетчатки глаза, защищая ее от воздействия синего света.

При светодиодном освещении (синий кристалл – желтый люминофор) такое соотношение не соблюдается, так как в его спектре есть провал. При большой дозе синего в спектре меланопсин M1 Brn3b+ не формирует сигнала на уменьшение диаметра зрачка. Тем самым большая часть синего света светодиода попадает на сетчатку глаза.

Учитывая эффект «меланопсинового креста» такие фирмы-изготовители светодиодов, как «SORAA», «Electrospell LED» и ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ», разработали новое поколение светодиодов, спектр света которых адаптирован для глаз человека, аналогичен спектрам лампы накаливания или галогенной лампы и приближен к спектру солнечного света.

**Выводы.** 1. В нормативных документах по гигиене труда нормы освещенности для люминесцентных ламп распространены на светодиодное освещение, при этом не учтены особенности спектров светодиодов, эффект «меланопсинового креста» и вновь открытые свойства меланопсина по управлению зрачком.

2. При светодиодном освещении белыми светодиодами (синий кристалл и желтый люминофор), которые имеют провал в спектре на 480 нм, происходит неадекватное управление диаметром зрачка глаза.

3. При проектировании светодиодов должны быть приняты меры по исключению эффекта «меланопсинового креста», присутствующего у всех ныне существующих энергосберегающих источников света и у подсветки устройств отображения информации.

4. Существующие стандартные требования к проектированию и применению светильников на разрядных лампах не применимы к светодиодной технике. Учитывая особенности биологического действия светодиодных источников света, необходимо разработать условия и порядок их использования как в быту, так и на производстве. При этом уровень освещенности, цветовая температура и спектральная характеристика светодиодного источника света должны обеспечивать комфортность освещения, адекватность управления зрачком и не влиять на биологические циклы человека.

5. Полученные экспериментальные данные о негативном влиянии светодиодных источников света на состояние зрительного анализатора, работоспособность и утомляемость свидетельствуют о необходимости пересмотра нормативной базы и проведения обязательной их сертификации.

#### Литература (п.1, 3, 5 – 11 – см. References)

2. Дейнего В.Н. Выбор концепции построения безопасной и энергосберегающей системы освещения «Не имеющий стратегии – жертва чужой тактики!». КАБЕЛЬ-news. 2012; 2: 50-64. URL: <http://www.kabel-news.ru>.
4. Зак П.П., Островский М.А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков. Светотехника. 2012; 3: 4-6.

#### References

1. Pauley S.M. Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. Med. Hypothes. 2004; 63: 588-96.
2. Deynego V. Choosing the concept of building a safe and energy-efficient lighting systems, “Not having a strategy - a victim of someone else’s tactics!” // CABLE-news - 2012 - № 2 - From 50-64 [www.kabel-news.ru](http://www.kabel-news.ru).
3. Health Effects of Artificial Light. Scientific committee on emerging and newly identified health risks. The SCENIHR adopted this opinion at its 17th plenary meeting on 19 March 2012.
4. “P.P. ZAC, M.A. OSTROVSKY “The potential danger of LED lighting for the eyes of children and adolescents / LIGHTING - 2012. - № 3 - S. 4-6.
5. Sparrow J.R., Nakanishi K., Parish C.A. The lipofuscin fluorophore A2E mediates blue light-induced damage to retinal pigment epithelial cells. Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 2000; 41: 1981-9.
6. Godley B.F., Shamsi F.A., Liang F.Q., Jarrett S.G., Davies S., Boulton M. Blue light induces mitochondrial DNA damage and free radical production in epithelial cells. J. Biol. Chem. 2005; 280: 21061-6.
7. Petteri Teikari. Biological effects of light. In: Thesis submitted in partial of fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science in Technology, Espoo, 26 October 2006.
8. Heeke D.S., White M.P., Mele G.D., Hanifin J.P., Brainard G.C., Rollag M.D. et al. Light-emitting diodes and cool white fluorescent light similarly suppress pineal gland melatonin and maintain retinal function and morphology in the rat. Lab. Anim. Sci. 1999; 49(3): 297-304.
9. Figueiro M.G., Rea M.S. Clinical study short-wavelength light enhances cortisol awakening response in sleep-restricted adolescents. Int. J. Endocrinol. 2012; 2012: 301935.
10. Foley L.E., Geger R.J., Reppert S.M. Human cryptochrome exhibits light-dependent magnetosensitivity. Nat. Commun. 2011; 2: 356.
11. Ensuring safety in LED lighting - 11/8/2012. URL: <http://www.smartgroup.org/industry-news/ensuring-safety-in-led-lighting/>