

6. *Вестник технологического университета*. 2016; 19(6): 149–51.
6. Узких О.С., Хомяков Д.М., Донерян Л.Г. Чувствительность показателей биологического мониторинга различных нефтезагрязненных почв. *Экология и промышленность России*. 2009; (5): 18.
7. Водянова М.А. Биотестирование и микробиологические методы в оценке загрязнений почв. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2006; (8): 202–6.
8. Тарасова Ж.Е. Гигиеническая оценка влияния нефти на почвенный микробиоценоз и самоочищающую способность почвы: Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. М.; 2006.
9. Хуснутдинова Н.Ю., Дубинина О.Н. Транслокация нефтяных углеводородов в сельскохозяйственные растения. *Медицина труда и экология человека*. 2016; (3): 65–8.
11. Красовицкая М.Л. *Вопросы гигиены атмосферного воздуха в районах нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий*. М.: Медицина; 1972.
12. Карцева Н.Ю. Гигиеническая оценка процессов миграции и трансформации нефти в почве: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2006.
4. Konovalova E.V., Korsunova T.M. Application of ameliorants in oil-contaminated soils: agricultural and environmental aspects. *Agronomiya*. 2015; (3): 16–21. (in Russian)
5. Ignat'ev Yu.A., Zaynulgabidinov E.R., Petrov A.M., Khabibullin R.E. Dynamics of the content of organic matter in oil-contaminated soil in the presence of a humic preparation and the preparation «Melaphene». *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016; 19(6): 149–51. (in Russian)
6. Uzkih O.S., Khomyakov D.M., Doner'yan L.G. Sensitivity of Parameters of Biological Monitoring of Various Oily Soils. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2009; (5): 18. (in Russian)
7. Vodyanova M.A. Biotesting and microbiological methods in assessing soil contamination. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. 2006; (8): 202–6. (in Russian)
8. Tarasova Zh.E. *Hygienic assessment of the oil influence on the soil microbiota and self-cleaning capacity of the soil*: Diss. Moscow; 2006. (in Russian)
9. Khusnutdinova N.Yu., Dubinina O.N. Translocation of petroleum hydrocarbons into agricultural plants. *Meditina truda i ekologiya cheloveka*. 2016; (3): 65–8. (in Russian)
10. Siron R., Pelletier E., Brochu C. Environmental factors influencing the biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1995; 28(4): 406–16.
11. Krasovitskaya M.L. *Questions of Air Hygiene in Areas of Oil Refining and Petrochemical Industries [Voprosy gigieny atmosfernogo vozdukh v rayonakh neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh predpriyatij]*. Moscow: Meditsina; 1972. (in Russian)
12. Kartseva N.Yu. *Hygienic estimation of migration processes and the transformation of the oil in the soil*: Diss. Moscow; 2006. (in Russian)

## References

1. Rakhmanin Yu.A. Updating of the methodological problems of the regulation of chemical pollution of the environment. *Gigiena i sanitariya*. 2016; 95(8): 701–7. (in Russian)
2. Abakumov E.V., Parnikova I.Yu., Lupachev A.V., Lodygin E.D., Gabov D.N., Kunakh V.A. Content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Antarctic stations regions. *Gigiena i sanitariya*. 2015; 94(7): 20–5. (in Russian)
3. Rusakov N.V., Rakhmanin Yu.A. *Waste, Environment, Human [Otkhody, okruzhayushchaya sreda, chelovek]*. Moscow: Meditsina, 2004. (in Russian)

Поступила 21.03.17  
Принята к печати 05.07.17

© КАПЦОВ В.А., ДЕЙНЕГО В.Н., 2017

УДК 613.5:628.97

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

## ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ – АКТУАЛЬНАЯ ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

<sup>1</sup> ФГУП «Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Железнодорожной Гигиены» Роспотребнадзора, 125438, Москва;

<sup>2</sup> ЗАО «ЭЛТАН», Фрязино

*Показано, что световая среда с учётом времени воздействия влияет на формирование миопии у молодого поколения ряда стран, в которых максимально эффективно внедряются энергосберегающие лампы. Рассмотрены механизмы негативного воздействия искусственного света на глаза человека и сформированы требования к оптимальной световой среде, которая будет способствовать снижению рисков развития миопии. Спектральный состав такой световой среды должен быть адекватен спектру солнечного света с цветовой температурой ниже 4000 К, а уровни освещённости следует выбирать по принципу комфортного освещения.*

**Ключевые слова:** миопия; светодиодное освещение; комфортная световая среда.

**Для цитирования:** Капцов В.А., Дейнего В.Н. Формирование оптимальной световой среды – актуальная гигиеническая проблема. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(10): 933-940. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-10-933-940>

**Для корреспонденции:** Капцов Валерий Александрович, доктор медицинских наук, профессор, член-корр. РАН, заведующий отделом ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены» Роспотребнадзора, 125438, Москва. E-mail: [kapcovva@rambler.ru](mailto:kapcovva@rambler.ru)

Kaptsov V.A.<sup>1</sup>, Deynego V.N.<sup>2</sup>

### THE FORMATION OF THE OPTIMAL LIGHT ENVIRONMENT IS THE ACTUAL HYGIENIC PROBLEM

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Railway Hygiene of the Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare, Moscow, 125438, Russian Federation;

<sup>2</sup>ZAO Company "ELTAN", Fryazino, 141190, Russian Federation

*The light environment with respect to time of the exposure is shown to affect the formation of myopia in the young generation in a number of countries that effectively implemented energy-saving lamps. There are both considered mechanisms of the negative impact of artificial light on the human eye and formed the requirements for an optimal light environment which will contribute to the reducing the risk of the development of myopia. The spectral composition of the light environment must be adequate spectrum of sunlight with color temperatures below 4000K, the light levels should be chosen by the principle for comfort lighting.*

**Key words:** myopia; led lighting; comfortable light environment.

**For citation:** Kaptsov V. A., Deynego V.N. The formation of the optimal light environment is the actual hygienic problem. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2017; 96(10): 933-940. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-10-933-940>

**For correspondence:** Valery A. Kaptsov, MD, PhD, DSci., professor, member-correspondent of RAS, Deputy Director for scientific work of the All-Russian Research Institute of Railway Hygiene of the Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare, Moscow, 125438, Russian Federation. E-mail: [kapcovva39@mail.ru](mailto:kapcovva39@mail.ru)

**Information about authors:** Kaptsov V.A., [orcid.org/0000-0002-3130-2592](http://orcid.org/0000-0002-3130-2592).

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgment:** The study had no sponsorship.

Received: 17 February 2017

Accepted: 05 July 2017

## Введение

Массовое внедрение энергосберегающих ламп в среду обитания человека инициировало многочислен- ные гигиенические исследования визуальных и не визу- альных эффектов воздействия спектра света на глаза и здоровье человека. Но исследователи не рассматривали корреляционные связи между световой средой и ростом миопии и не предлагали рекомендации по организации антимиопной световой среды кроме общих требований по уровню освещённости. Офтальмологи лечат миопию, а светотехники задают требования к световой среде и борются за экономию электроэнергии через внедрение новых энергосберегающих источников света (люминес- центных, компактных люминесцентных и светодиод- ных). А рост миопии при смене поколений энергосбере- гающих источников света является междисциплинарной проблемой и ею занимаются специалисты обществен- ного здравоохранения. Например, в США, где самое эф- фективное люминесцентное освещение, самый высокий уровень светового загрязнения, тратятся огромные день- ги на борьбу с миопией и слепотой.

В 1990 г. финансовые затраты от близорукости в Со- единенных Штатах были оценены в 4,8 млрд долларов. В 1995 г. экономические издержки от зрительных рас- стройств и инвалидности составили 38,4 млрд долларов, из них 22,3 млрд долларов прямых затрат и еще 16,1 млрд долларов в виде косвенных расходов каждый год. [1, 2].

В 2012 г. на решение проблем с нарушением зрения было потрачено около 140 млрд долларов. И эти расходы будут возрастать, если не будут найдены решения. При этом уровень миопии также продолжает расти. По про- гнозу Национального института глаза (США), количество людей с близорукостью к 2050 г. только в США превысит 40 000 000 человек (рис. 1).

Ощущая остроту проблемы, Отдел здравоохранения и медицины Национальной академии наук, техники и медицины в 2014 г. создал междисциплинарную комис- сию для «изучения основных принципов и стратегий в области общественного здравоохранения, чтобы умень- шить ухудшение зрения и поддержать здоровье глаз в Соединенных Штатах», в том числе для рассмотрения краткосрочных и долгосрочных стратегий совместных действий заинтересованных сторон и уровней власти. Следуя рекомендациям междисциплинарной комиссии, коллектив авторов, состоящий из 15 экспертов во главе с председателем Стивеном Тойчем, Лос-Анджелесский Университет Южной Калифорнии, институт Общественного здравоохранения, при спонсорской поддержке многочисленных организаций (Американская академия офтальмологии, Американская академия оптометрии, Американская ассоциация оптометристов, Ассоциация по исследованиям в области зрения и офтальмологии, Центры по контролю и профилактике заболеваний; На- циональный альянс для глаз и Исследования Зрения; Национальный центр детского видения и здоровья глаз; Национальный институт здоровья по предотвращению слепоты) в течение двух лет провели исследования и в 2016 году представили отчёт «Обеспечение здоровья глаз у населения. Императив: Видение будущего (2016)».

Авторы отчёта призывали Министерство здравоохра- нения и социальных служб, Центры США по контролю и про- филиактике заболеваний (CDC), профессиональные образо- вательные программы, а также государственные и местные органы здравоохранения принять общенациональные меры к снижению нарушений зрения в течение жизни людей всех возрастов, от самых маленьких до самых старых.

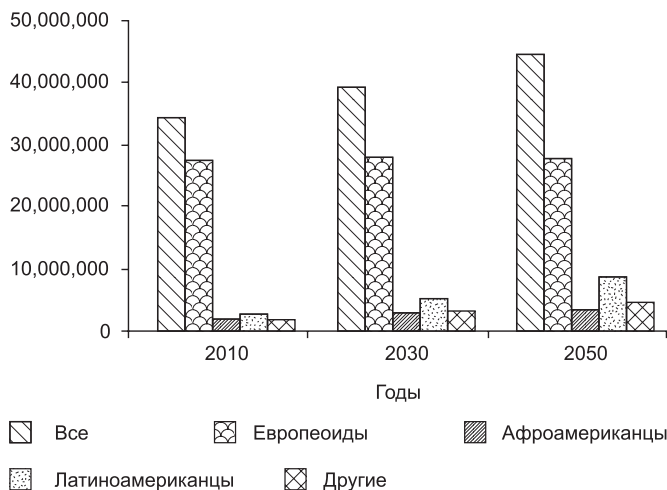


Рис. 1. Прогноз роста миопии в США на 2050 г.

Отчет содержал рекомендации, которые включали пять ключевых тем:

1. содействие информированности общественности за счёт своевременного доступа к точной и соответствующей местным условиям информации;
2. формирование фактических данных для разработки политики и решений на их основе;
3. расширение доступа к соответствующей клинической помощи;
4. укрепление общественного потенциала здравоохранения для поддержки здоровой зрительной деятельности;
5. оказание содействия сообществам, которые заботятся об освещении и зрительно-здоровой среде обитания.

Отсюда следует вывод, что гражданам рекомендовано наблюдаться у врачей, а офтальмологи, в свою очередь, обязаны своевременно оказывать профессиональную медицинскую помощь. В России информацию о проблемах миопии можно получить из разрозненных источников. Отсутствие сводной информации по заболеванию глаз не позволяет чиновникам на государственном уровне принимать оптимальные решения, при лоббировании тех или иных энергосберегающих источников света.

В отчёте говорилось о зрительно-здоровой среде оби- тания, но не концентрировалось внимание на энергосбе- регающей световой среде жителей США, которая явля- ется световой нагрузкой для глаз. В США установлено 2,5 млрд компактных люминесцентных ламп, при этом уровень миопии подрастающего поколения достиг значе- ний 43% и продолжает расти.

Значительное снижение остроты зрения у огромной массы людей, в том числе у молодого поколения – школь- ников и студентов – стало серьёзной проблемой нынеш- него века (<http://eyeshelp.ru/articles/263/#ixzz4P78JsJyL>). Среди студентов, имеющих отклонения в состоянии здоровья, лица с ослабленным зрением встречаются все чаще. Заболевания глаз у студентов прочно выходят на второе место после нарушений опорно-двигательного аппарата. В литературе [3] имеются работы, посвящён- ные патологии зрения (Марчук С.А., 2004; Loman J. et al., 2002; Kempen J.H., 2004; Sumgu O., 2007), в которых описывается высокий уровень аномалий рефракции, особенно миопии, у студентов во всем мире. Изучено изменение длины оси и глубины передней камеры гла- за за определенные промежутки времени у студентов (Jorge J., 2007), при этом основным видом аномалии рефракции у студентов является миопия. У российских студентов распространённость её составляет 44,5%.

При динамическом исследовании зрительных функций и рефракции обнаружено, что за 3-летний период обучения острота зрения у российских студентов снизилась на 29% [3].

Именно студенческая среда формирует профессиональную группу компьютерных операторов для управления наиболее техногенно-опасными объектами в промышленности и объектами в структуре МО РФ. Современные школьники и студенты составляют трудовой потенциал операторов-управленцев нашей промышленностью и оборонными объектами страны. Здоровье допризывников и, в частности, их зрение вызывает особую озабоченность у военных врачей. В России такая проблема в последние годы приобрела особое значение для здоровья юношей допризывного возраста, поскольку показатель годности допризывников к военной службе составляет лишь около 67%. Во многих публикациях авторы считают, что главной причиной развития миопии является наследственность. Но современные темпы роста этого заболевания таковы, что перекрывают темпы роста миопии по причине наследственности. Актуальность проблемы подчеркивают недавние исследования, проведенные в Южной Корее, в которой массово применяются компактные люминесцентные и светодиодные лампы, показавшие почти сюрреалистический результат: практически 96,5% из всех 19-летних мужчин призывного возраста имеют миопию [4].

Из приведённых фактов следует, что школьная миопия формируется в искусственной световой среде в течение ряда лет и для нее справедливо высказывание П.К. Анохина (1978 г.): «...Система создается тем, что изо дня в день повторяется стереотипный порядок одних и тех же условных раздражителей...». Для глаз раздражителем является световая среда со своим спектром света и уровнями освещённости. В световой среде с солнечным светом уровень миопии составляет 0,8%, в световой среде с энергосберегающим светом уровень миопии в Тайвани составляет 75%, в Сингапуре – 65–90%, в США – 25–43%.

Следует разобраться, какие отклонения в искусственной световой среде в отличие от солнечной порождают хаос проблем в зрительном анализаторе человека.

В рамках проведенных исследований было показано, что все искусственные источники имеют спектры, отличные от солнечного света, от воздействия которого не нужно применять гигиенические меры защиты [5].

Искусственная световая среда формирует не только первоначальные предпосылки к возникновению заболевания глаз, но и:

- неадекватность управления диаметром зрачка на сжатие;
- аккомодационным аппаратом глаза;
- потоками водянистой влаги;
- процессами дегградации коллагена склеры глаза.

Для отработки методики гигиенической оценки воздействия того или иного спектра света на глаза человека рассмотрим механизмы, которые увеличивают риски развития миопии, которая вызвана приобретённой деформацией переднего и заднего отделов глазного яблока, изменяющей структуру коллагенной системы роговицы и склеры. В 1887 году Ф.Ф. Эрисман отмечал, что «...неминуемой точкой отправления при всех гигиенических исследованиях является стремление найти те законы, которые управляют здоровьем человека, и исследовать как при помощи эксперимента, так и путём статистических наблюдений все те общественные и частные явления, понимание которых непосредственно может содействовать открытию этих законов, так что

все явления окружающей среды интересуют гигиенистов лишь настолько, насколько они могут отражаться на здоровье человека».

Целью настоящего исследования явилась попытка среди многообразия механизмов воздействия света на ткани глаза выявить общие закономерности, которые позволят отработать требования к световой среде, уменьшающей риски возникновения миопии.

## Материалы и методы

Исходя из этого, рассмотрим некоторые общие закономерности взаимодействия энергии света с клетками функциональных структур глаза (диаметра зрачка, роговицы, сетчатки и склеры) с позиции гигиениста.

Функциональная структура глаза сформирована в спектре солнечного света, который управляет её первоначальными настройками:

- сужением зрачка до диаметра, при котором обеспечивается максимальное качество наблюдения предмета при заданных параметрах естественной световой среды;
- упруго-механические параметры склеры глаза;
- алгоритмом управления мышцами Брюкке, Иванова, Мюллера, Калазанса, который обеспечивает соблюдение равенства притока и оттока водянистой влаги и взаимодействие с механизмом аккомодации [6].

Водянистая влага образуется в цилиарном теле, поступает в заднюю камеру глаза, через промежуток между радужкой и хрусталиком, далее через зрачок переходит в переднюю камеру. Осуществив циркуляцию по передней камере и удовлетворив потребности обмена веществ хрусталика и роговицы, водянистая влага покидает глаз через радужно-роговичный угол (между роговицей и радужкой), который образован гребенчатыми связками. Отток продолжается через увеальную и корнеосклеральную сетчатую структуру, и выходит в системное венозное кровообращение. Водянистая влага образуется специальными не пигментированными эпителиальными клетками цилиарного тела из крови. Секрция влаги происходит со скоростью 2–3  $\mu\text{л}/\text{мин}$ . Отток жидкости происходит через трабекулярную сеть, увеосклеральную систему и эписклеральные сосуды. Человеческий глаз производит от 3 до 9 мл водянистой влаги в сутки. Соотношение количества образованной водянистой влаги к выведенной определяет внутриглазное давление.

При дисгармонизации функционирования зрачка и мышц – Брюкке, Иванова, Мюллера, Калазанса – процесс притока и оттока водянистой влаги классифицируется как циклический процесс с деструктивным остатком влаги, который способствует нарушению равновесия гидродинамических сил в глазу.

В среде искусственного света зрачок глаза более раскрыт, чем в среде солнечного света при равном уровне освещённости сетчатки и одинаковой цветовой температуре. Это обусловлено провалом в спектре искусственного света в районе 480 нм и характеризуется как невыполнение в этой световой среде условия меланопсинового эффекта удержания зрачка в закрытом состоянии. Для выполнения этого условия в спектре света должна присутствовать доза синего света 480 нм, равная аналогичной дозе солнечного света.

Накопленная дополнительная напряженность в мышцах ресничного тела и невыполнение условия меланопсинового эффекта удержания зрачка в закрытом состоянии повышает риски нарушения равновесия гидродинамических сил в глазу. Нарушения этого равновесия может приводить к начальным малым изменениям длины опти-

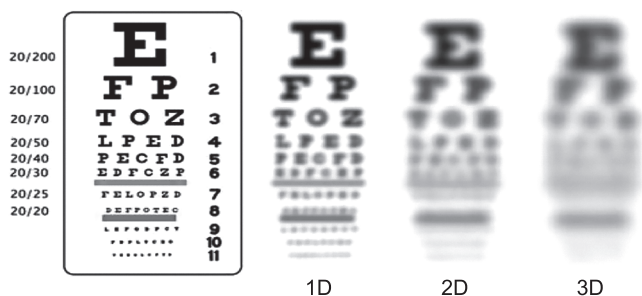


Рис. 2. Качество зрения при разных уровнях расфокусировки изображения в диоптриях.

ческой оси и, как следствие, к существенному ухудшению качества зрения.

На рис. 2 показано изменение качества зрения при разных уровнях расфокусировки изображения в диоптриях.

Расфокусировка изображения в оптометрии, согласно принципу Голстранда, характеризуется диаметром диска размытости [7], который определяется по формуле (1):

$$b^\circ = 0,057p_{\text{mm}}D, \quad (1)$$

где  $b^\circ$  – диаметр диска размытия (град.);  $p_{\text{mm}}$  – диаметр зрачка (mm);  $D$  – расфокусировка (диопт.).

Из формулы следует, что неадекватное управление диаметром зрачка на закрытие влияет на диаметр диска размытия. В работе [7] говорится о том, что если глаз де-

фокусируется по какой-либо причине, то диаметр диска размытости может быть использован в качестве первого признака для оценки влияния на остроту зрения. Более точная обработка должна использовать физическую оптику, которая принимает во внимание дифракционные эффекты [8, 9]. На начальный уровень диаметра диска размытости влияет D-расфокусировка в диоптриях, которая функционально связана с удлинением оси глаза. Удлинение оси глаза на 1 мм влечёт за собой усиление близорукости на 3 диоптрии или 0,33 мм на одну диоптрию. При аккомодации в одну диоптрию зрачок сужается на 0,18 мм. Малые изменения в геометрии приводят к первому шагу миопии, дисгармонизации работы мышц и перераспределению потоков водянистой влаги, что создаёт в функциональной структуре глаза дополнительные внутренние напряжения, которые офтальмологами компенсируются с помощью очков или линз.

Оболочка глаза подвергается действию как гидродинамических сил притока и оттока внутренней влаги, механическому воздействию мышц глаза, так и световой нагрузки, которая через фотохимические реакции влияет на коллаген роговицы и склеры глаза. В этих частях оболочки глаза нити коллагена сшиты и имеют разную пространственную ориентацию. Это и определяет оптические и механические свойства роговицы и склеры как составных частей оболочки. Наиболее уязвимым местом к этому воздействию является стык между роговицей и склерой.

На рис. 3 приведено сравнение микроструктуры роговицы, лимба и склеры.

В роговице глаза коллаген участвует в образовании гексагональных решёток десцеметовых мембран, что обеспечивает её прозрачность, а также участие этих структур в преломлении световых лучей. При этом спектр света не только несет информацию о среде, но и участвует в формировании структуры роговицы, влияя на синтез коллагена.

На рис. 4 приведено строение роговицы с указанием её функциональных элементов.

Эпителиальный слой – поверхностный защитный слой, восстанавливающийся при повреждении. Так как роговица – бессосудистый слой, то за «доставку кислорода» отвечает именно эпителий, забирающий кислород из слезной плёнки, которая покрывает поверхность глаза. Эпителий также регулирует поступление жидкости внутрь глаза. Под эпителием находится множество субэпителиальных нервных волокон, которые обеспечивают роговице большую чувствительность. При малейшем касании, угрожающем травмой глазу, нервы шлют мгновенный сигнал в мозг. Последний даёт сигнал векам, – самым сильным инструментам защиты глаза, – которые моментально смыкаются. То же происходит, когда большинство слезной плёнки утекает в нос. Роговица подсыхает, нервы реагируют на это, и веки опять моргают, смачивая роговицу, таким образом восстанавливая нужную толщину слезной пленки.

Боуменова мембрана расположена сразу под эпителием, не содержит клеток и состоит из переплетённых коллагеновых фибрилл и связанных с ними протеогликанов. Она защищает от внешних воздействий, участвует в питании роговицы и поддерживает её форму. Но при повреждении не восстанавливается.

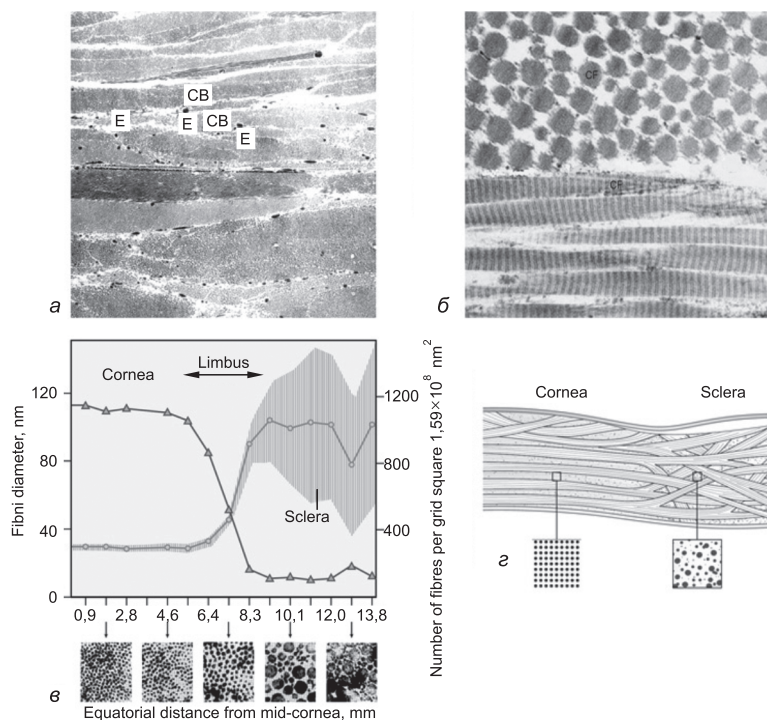


Рис. 3. Сравнение микроструктуры роговицы, лимба и склеры: А – низкое ( $\times 4750$ ) увеличение человеческой склеры в области стромы; СВ – расслоение коллагена, Е – эластиновые волокна; Б – высокое увеличение ( $\times 72,500$ ) просвечивающей электронной микрофотографии человеческой склеры в области стромы; CF – коллагеновые фибриллы; В – схема сравнения диаметров коллагеновых фибрилл и их плотности в роговице и склере; Г – схема, иллюстрирующая более высокую плотность переплетающихся пучков коллагена в склере, чем в строме роговицы (склера имеет более крупные и разнообразные по диаметрам фибриллы коллагена и межфибриллярные расстояния (<http://www.tryphonov.ru/tryphonov2/terms2/cornea.htm>)).

Строма – наиболее объёмная часть роговицы. Основная её часть – коллагеновые волокна, расположенные горизонтальными слоями. Также содержит клетки, отвечающие за восстановление.

Десцеметова мембрана отделяет строму от эндотелия. Обладает высокой эластичностью, устойчива к повреждениям.

Эндотелий отвечает за прозрачность роговицы и участвует в её питании. Очень плохо восстанавливается. Выполняет важнейшую функцию «активного насоса», отвечающего за то, чтобы лишняя жидкость не скапливалась в роговице (иначе произойдет её отёк). Таким образом эндотелий поддерживает прозрачность роговицы.

Количество эндотелиальных клеток в течение жизни постепенно снижается от 3500 на 2 мм при рождении до 1500–2000 клеток на 2 мм в пожилом возрасте. Снижение плотности этих клеток может происходить из-за различных заболеваний, травм, операций. При плотности ниже 800 клеток на 2 мм роговица становится отёчной и теряет свою прозрачность. Шестым слоем роговицы часто называют слезную пленку на поверхности эпителия, которая также влияет на оптические свойства глаза.

Известно, что коллаген является главной структурной поддержкой кожи и оболочки глаза. Он делает оболочку прочной и гибкой, а также удерживает влагу. Со временем коллагеновые волокна слабеют, теряют свою эластичность, их количество уменьшается. Лучи длиной волны 633 нм являются наиболее эффективными среди красного света, они хорошо известны в светотерапии, активируют каскад событий, необходимых для достижения реорганизации и уплотнения вспомогательной коллагеновой матрицы. Эти лучи модулируют активность ключевых клеток фибробластов, которые производят коллаген. За счёт этого улучшается кислородное дыхание роговицы, восстанавливается необходимый уровень её водного баланса, происходит выведение токсинов, вследствие чего ускоряется регенерация тканей и восстановление коллагенового слоя из основных элементов. Для обеспечения необходимой упругости роговицы и стабильности её формы, при которых обеспечивается нормальное качество зрения, необходимо иметь в ней оптимальное количество коллагена. Например, при лазерной коррекции зрения (миопии) испаряют несколько микрон стромы роговицы. При этом меняется форма роговицы и останавливается прогрессирующая миопия.

## Результаты

Итак, два основных момента, на которые стоит обратить внимание гигиенистам: 1. в оболочке должно быть достаточно строительного материала (в виде аминокислот, что обеспечивается рациональным питанием); 2. для омоложения структуры коллагена под действием красного света нужно время – более десяти недель. В ряде исследований показано, что выращивание животных (обезьян, морских свинок, цыплят) от рождения до зрелого возраста при синем освещении приводит к развитию дальнозоркости (+4 D), а при красном освещении – к развитию миопии (–6 D) [10].

Свет, проходя через оптическую систему глаза, попадает на его сетчатку. В нашей статье авторы не рассматривают взаимодействие света и коллагена стекловидного тела, так как это отдельная тема исследований причин возникновения «мушек» при работе с современными мониторами, которые имеют избыточную дозу красного поляризованного света. Поляризованный свет – это то, на чём основана работа ЖК-дисплеев. Отдельного вни-

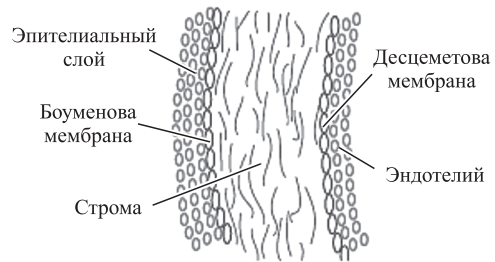


Рис. 4. Строение роговицы глаза (<http://collagen-japanese.blogspot.ru/>).

мания заслуживает LCD-монитор (Liquid Crystal Display – жидкокристаллический дисплей), поскольку наблюдалась тенденция среди лиц, жаловавшихся на появление «мушек» именно после того, как они пересели за такой монитор (<http://mushek.net/faq/1-2>).

Стекловидное тело имеет желеобразную консистенцию и на 99% состоит из воды. Его объём равен примерно 4 мл. Гиалуроновая кислота обеспечивает эластичность стекловидного тела, а коллаген – структурность. Комплекс коллаген – гиалуроновая кислота обеспечивает не только прозрачность структуры, но и является барьером для проникновения больших молекул, а также ингибитором разрастания в стекловидном теле соединительнотканых клеток и сосудов. Помимо коллагена и гиалуроновой кислоты в стекловидном теле находится ряд важных в функциональном отношении веществ. В первую очередь это белки: оптицин, витрин, фибулин-1 и нидоген-1. Наиболее известны функции оптицина. Он представляет собой богатый лейцином протеогликан, интимно связанный с коллагеновыми фибриллами стекловидного тела, способный регулировать диаметр фибриллы коллагена. О функциях других белков стекловидного тела пока известно мало: место их синтеза, химический состав. Предполагается, что они участвуют в стабилизации комплекса коллаген – гиалуроновая кислота.

Независимо от возраста, при близорукости структура стекловидного тела нарушена значительно чаще. Проявляется это интенсивным рассеиванием света и появлением обширных оптически пустых мест (syneresis) (<http://zreni.ru/print:page,1,2036-steklovidnoe-telo.html>).

В процессе светового цикла при окислении трансретинола в клетках сетчатки глаза получается ретиноевая кислота, концентрация которой существенно влияет на динамику растяжения склеры глаза [11]. Световая зрительная нагрузка (искусственные источники света, свет экранов мониторов) способствует генерации трансретинола. Результаты экспериментальных исследований показали, что различные ткани глазного яблока (хориоидея, пигментный эпителий сетчатки) способны синтезировать ретиноевую кислоту, которая участвует в регуляции роста глазного яблока. Концентрация ретиноевой кислоты в организме должна поддерживаться на строго определенном уровне. Избыток ретиноевых кислот способен ингибировать синтез склеральных протеогликанов. Торможение этого синтеза ослабляет склеру и создает структурную основу для возникновения миопии. При изучении культуры клеток фибробластов склеры человека было обнаружено 6 типов рецепторов к ретиноевой кислоте (RAR alpha, RAR beta, RAR gamma, RXR alpha, RXR beta, и RXR gamma). Некоторые исследователи рассматривают ген рецептора RAR alpha как потенциальный ген развития миопии [11]. По данным литературы, действие ретиноевой кислоты приводит к изменению пролиферативной активности

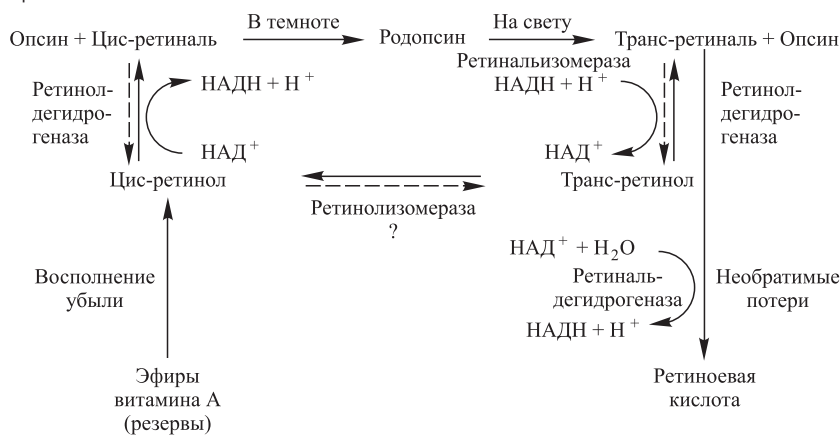


Рис. 5. Общая схема образования ретиновой кислоты [12].

фибробластов склеры. Так, Zhonghua и соавт. выявили, что при экзогенном действии ретиновой кислоты *in vitro* пролиферативная активность фибробластов склеры человека снижается [12, 13].

Точный механизм действия ретиновой кислоты на пролиферацию фибробластов склеры до конца не известен и нуждается в дополнительных исследованиях. Однако ряд исследователей предполагает, что в основе изменения пролиферативной активности под действием ретиновой кислоты лежит усиление экспрессии белка фибулина-1, который создает межмолекулярные связи, стабилизирующие структуру экстрацеллюлярного матрикса, а также определяет пролиферацию, миграцию и дифференцировку различных клеток, в частности, склеры. Данные по изучению ретиновой кислоты на рост глазного яблока необходимо использовать при разработке методов профилактики и лечения миопии, направленных на уменьшение её содержания в глазах. С гигиенической точки зрения, – это уменьшение световой нагрузки путём нормализации спектра энергосберегающих источников света.

В сетчатке глаза человека выявлено 4 типа зрительных пигментов. Один тип обнаружен в палочках (родопсин) и три в колбочках (иодопсин). В зависимости от спектраль-

ных особенностей поглощения световой энергии, колбочковые пигменты разделяются на чувствительные к красной (570 нм), зелёной (540 нм) и синей частям спектра (440 нм). 11-цис-ретиноаль является хромофором для всех четырёх классов зрительных пигментов человека.

Основным механизмом преобразования световой энергии является изменение характера взаимодействия хромофора (11-цис-ретиноаль) с белком (опсин). Механизм этого процесса сводится к тому, что при действии световой энергии происходит изомеризация 11-цис-ретиноаля с превращением его в полностью транс-ретиноаль. Изменение строения молекулы ретиноаля разрушает её связь с опсином, что приводит к нарушению третичной структуры белка.

Этот процесс происходит через ряд звеньев с образованием промежуточных продуктов. Эти промежуточные вещества существуют исключительно короткое время и их можно анализировать только при низких температурах. Наиболее важным звеном в этом процессе является переход метародопсина I в метародопсин II. Именно на этом этапе и происходят конформационные изменения белковой части родопсина, что приводит к появлению у последнего ферментативной активности. Эти изменения инициируют дальнейший каскад процессов преобразования, о которых речь пойдет несколько ниже.

После разрушения связи хромофора с опсином наступает обратный процесс, т. е. регенерация родопсина. Происходит это следующим образом. При обесцвечивании зрительного пигмента полностью-транс-ретиноаль высвобождается из него и преобразуется в полностью-транс-ретинол. Полностью-транс-ретинол из наружных сегментов фоторецепторов поступает в пигментный эпителий сетчатки, где он эстерифицируется, превращаясь в полностью-транс-ретинол эфир. Последний превращается в 11-цис-ретинол благодаря деятельности фермента – ретиноид изомеразы. Образовавшийся в результате реакции 11-цис-ретинол возвращается в фоторецепторы, где, окисляясь, превращается в 11-цис-ретиноаль.

В клетках эпителия ретиноль восстанавливается в ретинол и часть ретиноаля превращается в ретиновую кислоту. Общий механизм образования ретиновой кислоты приведен на рис. 5 [12].

Из общего механизма образования ретиновой кислоты в колбочках и палочках следует, что для её образования в спектре света должны присутствовать длины волн 570, 540 и 440 нм.

Такие длины волн присутствуют в спектре галогенных ламп. При освещении (от 0 до 3000 люкс) галогенными лампами культур сетчатки глаз выпяты получено увеличение выработки ретиноаля. С изменением общего уровня освещенности меняется соотношение количества ретинола и ретиноаля.

При этом необходимо отметить, что максимально эффективно энергия поглощается на длине волны в 570, 540 и 440 нм. Это резонансные частоты поглощения энергии для колбочек и палочек.

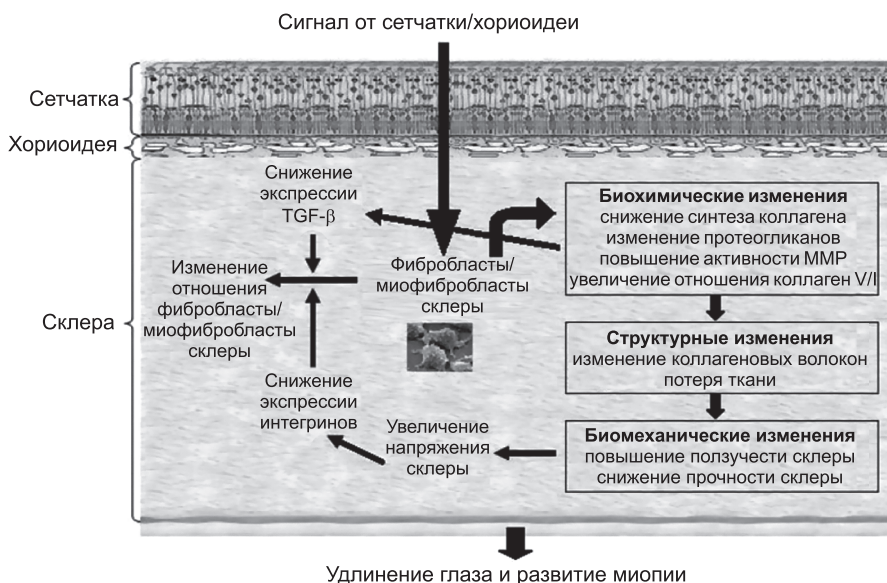


Рис. 6. Модель роли миофибробластов в развитии и прогрессирования близорукости (по Weerman R.W. [12]).

Известно, что родопсин синтезируется из витамина А, который поступает с пищей в организм человека. Для его преобразования в родопсин в структурах глаза необходимо, чтобы в спектре света присутствовали следующие длины волн: 380, 480, 497, 500 и 543 nm. Дефицит цинка также может ухудшать всасывание, транспорт и метаболизм витамина А, поскольку он необходим для синтеза транспортных белков и в качестве кофактора для превращения ретинола в ретиналь.

Итак, в спектре современных энергосберегающих источников света должны присутствовать следующие длины волн:

- 380, 480, 497, 500 и 543 nm – для синтеза родопсина из витамина А;

- 570, 540 и 440 nm – для обеспечения нормальной работы пигментов колбочек и палочек и синтеза оптимального уровня ретиноевой кислоты.

Для синтеза оптимального уровня ретиноевой кислоты необходимо, чтобы амплитуда энергии на длинах волн 570, 540 и 440 nm равнялась уровню энергии аналогичных волн в солнечном спектре света, для которого не нужно применять гигиенические меры защиты. Уровень энергии, поступающий на сетчатку глаза, зависит от диаметра зрачка глаза, который при солнечном свете имеет минимальные размеры.

Из-за провала в спектре энергосберегающих источников света на длине волны 480 nm зрачок глаза раскрыт больше, чем при солнечном свете той же цветовой температуры и уровня освещенности на сетчатке. Применение энергосберегающих источников света способствует попаданию большей энергии на палочки и колбочки сетчатки и, как следствие, увеличение выработки ретиноевой кислоты.

На основании экспериментальных исследований последних лет разработана модель роли миофибробластов в развитии и прогрессировании близорукости [12]. Схема этой модели приведена на рис. 6

Механизм связи (сигнал от сетчатки – удлинение глаза) объясняется следующим образом [12, 13]. Ретиносклеральный механизм активизирует потерю ткани склеры, что является причиной её истончения. Потерю ткани вызывает частичное уменьшение синтеза компонентов экстрацеллюлярного матрикса и ускоренная деградация. Истончение склеры вызывает экспрессию генов склеральных миофибробластов, что приводит к изменению коллагенового матрикса и впоследствии проявляется уменьшением диаметра коллагеновых фибрилл. Как истончение склеры, так и её структурные изменения уменьшают сопротивление действию нормального внутриглазного давления и увеличивают возможность растяжения склеры. Этот процесс также увеличивает механическое напряжение в межклеточном матриксе, содержащем волокнистые структуры, стимулируя тем самым развитие у фибробластов актиновых сократительных микрофиламентов. Главным фактором, способствующим дифференцировке фибробластов в премиофибробласты, является механическое напряжение.

Итак, ретиная кислота воздействует на коллагеновое волокно склеры, которое расположено экваториально (рис. 7).

Экваториальное расположение коллагеновых волокон заднего полюса склеры подобно пружине облегчает возможность его растяжения для увеличения оси глаза, позволяющего приспособить глаз под текущую зрительную нагрузку. Ретиная кислота меняет механические характеристики коллагеновых волокон пружины.

При несоблюдении оптимального уровня и баланса витамина А – ретиноевой кислоты – в сетчатке глаза будет

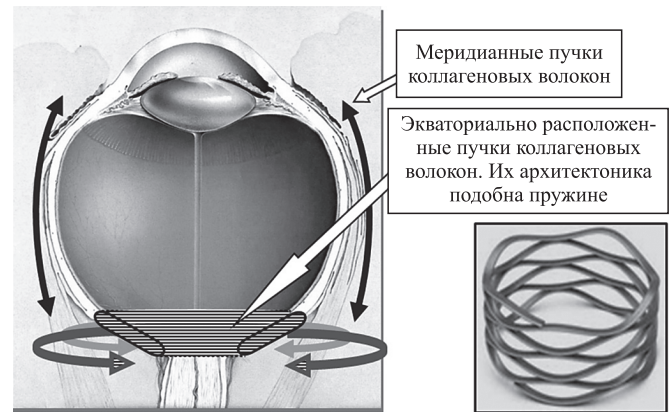


Рис. 7. Расположение коллагеновых волокон по сегментам и по поверхности склеры (схема И.Н. Кошица).

развиваться близорукость или дальнозоркость. На этот процесс регулирующую роль оказывают дофамин и мелатонин, которые вырабатываются амакриновыми клетками сетчатки глаза. Уровни этих гормонов также зависят от спектра света и подчиняются циркадному ритму.

В основу методического подхода формирования общего алгоритма задания требований к комфортной световой среде положен принцип оптимальной достаточности. В основе этого принципа лежит закономерность Арндта–Шульца и циклический характер протекания биохимических процессов под воздействием дозы света с накоплением деструктивных остатков (Q-закон) [14]. В соответствии с законом Арндта–Шульца реакция на воздействие бывает нейтральным, стимулирующим и замедляющим протекание биохимических процессов.

### Обсуждение

Итак, на основе представленной информации можно сформировать гигиенические требования к спектральному составу света энергосберегающих источников, при которых будут уменьшаться риски возникновения миопии и дальнозоркости.

Общий последовательный алгоритм создания требований к комфортной световой среде с позиции гигиениста:

1. Выделить безопасные области на энергоспектральной характеристике солнечного света по гигиеническим критериям (минимум ущерба (риска ущерба) от световой нагрузки при максимуме зрительной эффективности).

2. Из сравнительного анализа спектров современных энергосберегающих ламп и солнечного света, от воздействия которого не нужно принимать гигиенические меры защиты, определить критические точки несовпадения. По множеству Q-законов воздействия света определить значимые длины волн, которые должны входить в спектр света искусственного источника и по дозе которых нужна коррективка.

3. Для данного перечня значимых длин волн по кривым Арндта–Шульца определить оптимально достаточные уровни энергии, которые не должны быть меньше и не должны превышать значений для солнечного света при выбранном уровне освещенности. На основании этого формируется энергоспектральная характеристика искусственного источника света.

4. Для каждой энергоспектральной характеристики необходимо определить цветовую температуру и по кривой Круитхофа найти наиболее комфортные освещенности, которые являются оптимальными для качественного выполнения зрительной работы без ущерба для здоровья.

## Выводы

1. Специалисты общественного здравоохранения озабочены ростом миопии среди населения стран Китая, Южной Кореи, Японии и США и ростом школьной миопии. В своих рекомендациях они отмечают, что необходимо более эффективно оказывать содействие сообществам, которые заботятся об освещении и визуальном здоровье среды обитания.

2. В России отсутствует аналог американской междисциплинарной комиссии для «изучения основных принципов и стратегий в области общественного здравоохранения, чтобы сократить ухудшение зрения и укрепить здоровье глаз в Соединенных Штатах», в том числе краткосрочные и долгосрочные стратегии совместных действий заинтересованных сторон и уровней власти.

3. Систематизация механизмов воздействия света на ткани глаза в рамках множества Q-законов позволит определить совокупность длин волн, определить для них оптимально достаточные уровни энергии света, которые не должны быть меньше и не будут превышать значений для солнечного света при выбранном уровне освещенности и на основании этого сформировать оптимальную энерго-спектральную характеристику искусственного источника света.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература (п.п. 1, 4, 7–9, 13 см. References)

2. Ху Т. Экономические издержки нарушения зрения и инвалидов. Специальный доклад Национального института глаза (ЯЭУ). Бетесда, США; 1981.
3. Журавлева Е.В. *Адаптационные особенности зрительного анализатора у студентов различных этнических групп в процессе обучения*: Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. Нижний Новгород; 2011.
5. Дейнего В.Н., Капцов В.А., Балашевич Л.И., Светлова О.В., Макаров Ф.Н., Гусева М.Г. и др. Профилактика глазных заболеваний у детей и подростков в учебных помещениях со светодиодными источниками света первого поколения. *Российская детская офтальмология*. 2016; (2): 57–73.
6. Светлова О.В., Кошиц И.Н. *Взаимодействие основных путей оттока внутриглазной жидкости с механизмом аккомодации*: Учебное пособие. СПб.; 2002.
10. Зак П.П. Основания ограничения цветовой температуры светодиодного освещения в образовательных, дошкольных и лечебных учреждениях. М.; 2015.
11. Юрьева С.Л., Обрубов С.А., Иванова А.О. Способ моделирования осевой близорукости. Патент РФ № 2541743; 2015.
12. Обрубов С.А., Хамнагдаева Н.В., Семенова Л.Ю., Порядин Г.В., Салмаси Ж.М. Экспериментальные модели осевой близорукости: подходы к изучению механизмов развития. *Российская детская офтальмология*. 2015; (2): 58.

14. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Q-закон как методическая основа гигиенических требований к световой среде. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(8): 747–751.

## References

1. Ellwein L. *Personal Communication*. Bethesda, MD: 1998.
2. Khu T. *Economic costs of visual impairment and disabled. Special report of the National Eye Institute (NEI) [Ekonomicheskie izderzhki narusheniya zreniya i invalidov. Spetsial'nyy doklad Natsional'nogo instituta glaza (YaEU)]*. Bethesda, MD; 1981. (in Russian)
3. Zhuravleva E.V. Adaptive features of the visual analyzer for students of different ethnic groups in the learning process: Diss. Nizhny Novgorod; 2011. (in Russian)
4. Jung S.K., Lee J.H., Kakizaki H., Jee D. Prevalence of Myopia and its Association with Body Stature and Educational Level in 19-Year-Old Male Conscripts in Seoul, South Korea. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2012; 53(9): 5579–83.
5. Deynego V.N., Kapsov V.A., Balashevich L.I., Svetlova O.V., Makarov F.N., Guseva M.G., et al. Prevention of eye diseases in children and adolescents in classrooms with LED light sources of the first generation. *Rossiyskaya detskaya oftal'mologiya*. 2016; (2): 57–73. (in Russian)
6. Svetlova O.V., Koshits I.N. *Interaction of the main ways of outflow of the intraocular fluid with the mechanism of accommodation: Textbook [Vzaimodeystvie osnovnykh putey ottoka vnutriglaznoy zhidkosti s mekhanizmom akkomodatsii: Uchebnoe posobie]*. St. Petersburg; 2002. (in Russian)
7. Strasburger H., Bach M., Heinrich S. Blur Unblurred – A Mini-Tutorial (ECVP 2016). Available at: [http://hans-strasburger.userweb.mwn.de/reprints\\_b.html](http://hans-strasburger.userweb.mwn.de/reprints_b.html)
8. Ravikumar A., Sarver E.J., Applegate R.A. Change in visual acuity is highly correlated with change in six image quality metrics independent of wavefront error and/or pupil diameter. *J. Vis.* 2012; 12(10): 11.
9. Smith G. Angular diameter of defocus blur discs. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 1982; 59(11): 885–9.
10. Zak P.P. *The Reasons for Limiting the Color Temperature of LED Lighting in Educational, Preschool and Medical Institutions [Osnovaniya ogranicheniya tsvetovoy temperatury svetodiodnogo osveshcheniya v obrazovatel'nykh, doshkol'nykh i lechebnykh uchrezhdeniyakh]*. Moscow; 2015. (in Russian)
11. Yur'eva S.L., Obrubov S.A., Ivanova A.O. A method of modeling axial myopia. Patent RF № 2541743; 2015. (in Russian)
12. Obrubov S.A., Khamnagdaeva N.V., Semenova L.Yu., Poryadin G.V., Salmasi Zh.M. Experimental models of axial myopia: approaches to the study of development mechanisms. *Rossiyskaya detskaya oftal'mologiya*. 2015; (2): 58. (in Russian)
13. Strauss O. Retinal Pigment Epithelium in Visual Function. *Physiol. Rev.* 2005; 85(3): 845–81.
14. Kapsov V.A., Deynego V.N. Q-law as a methodological basis of hygienic requirements for the light environment. *Gigiena i sanitariya*. 2017; 96(8): 747–751.

Поступила 17.02.17  
Принята к печати 05.07.17