

ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА БАЗЕ БЕЛЫХ И ЦВЕТНЫХ СВЕТОДИОДОВ

© 2010 г. С. М. Гвоздев*, канд. техн. наук; А. Б. Карабин*; А. А. Ливенцова**

* Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский светотехнический институт им. С.И. Вавилова, Москва

** Московский энергетический институт (Технический университет), Москва

E-mail: gvozdev@vnisi.ru, GvozdevSM@mpei.ru

Рассмотрена методика регулирования параметров светодиодов с учетом психофизических особенностей оператора. Приведены результаты исследований и определена возможность создания высокоэффективного светодиодного RGB-светильника с высокой светоотдачей, возможностью регулирования яркости и цветности в широких пределах. Определена методика настройки на индивидуальные психофизические параметры человека, а также возможность использования циркадного суточного ритма человека.

Ключевые слова: светодиоды, яркость, цветность, психофизиологическое состояние человека, пространственно-частотная контрастная чувствительность, цветоразличительная способность, яркостная адаптация, интеллектуальное комфортное освещение.

Коды OCIS: 330.1720, 330.1800, 330.3790, 330.4060, 330.6180, 3000.30290, 3000.30820

Поступила в редакцию 24.02.2010

В настоящее время все большее применение в светотехнической и оптической промышленности находят осветительные приборы на основе светодиодов. Твердотельные источники имеют высокий срок службы и малое энергопотребление. Важными эксплуатационными характеристиками светодиодных светильников являются параметры регулирования яркости и цветности. Управление светового цвета по заданным алгоритмам позволяет задавать и регулировать освещение в соответствии с циркадным суточным ритмом или биоритмом человека, а также учитывать его индивидуальные психофизиологические особенности для улучшения условий жизнедеятельности [1].

Исследованию влияния светового пространства на психофизиологические факторы, определяющие жизнедеятельность человека, посвящено множество работ [1, 4–9]. Зрительная система человека получает информацию об освещенном пространстве исходя из распределения яркости и цветности в поле зрения. Фильтрация этой информации определяется структурой рецептивных полей, которые характеризуются той или иной контрастной и спектральной чувствительностью. Поэтому объединение про-

странственно-частотной контрастной чувствительности с цветоразличительной способностью органа зрения может дать единый количественный критерий изменения чувствительности зрения и определить влияние психофизиологического состояния человека. Оценка изменений цветовой контрастной чувствительности может явиться достаточно точным количественным критерием влияния незрительных процессов в организме человека, определяя его психофизиологическое состояние.

Известно, что экстремальные условия, усталость, болезнь и др. приводят к сокращению объема получаемой информации, так как снижается контрастная чувствительность в широкой области пространственных частот, что определяет потерю визуальной информации [2, 3]. Так, при увеличении давления (гипербарии), ухудшении внешних факторов пространственно-частотная характеристика органа зрения (ПЧХ ОЗ) сужается и пропускает меньшее количество информации, оставляя только информацию для ориентации человека в пространстве (низкие пространственные частоты) [3]. Тот же самый эффект наблюдается, когда человек серьезно заболевает. В медицине этот эффект давно

известен и широко применяется в диагностике и лечении человека [9]. Яркой иллюстрацией данных процессов может служить серия автопортретов, созданных немецким живописцем А. Редершейдтом после кровоизлияния в теменную долю правого полушария мозга [2]. Через 2 месяца после кровоизлияния на работах художника изображены лишь некоторые черты с левой стороны картины (так как было повреждено правое полушарие мозга), а уже через 9 месяцев на картинах можно узнать художника (произошло восстановление зрения).

Восприятие визуальной информации может характеризоваться различными областями адаптации и комфортности. По результатам экспериментальных исследований ПЧХ ОЗ в работе [6] были определены зоны изменения зависимостей контрастной чувствительности ($K_{\text{пор}}^{-1}$) при дневном и сумеречном зрении в широком диапазоне пространственных частот (ν) (рис. 1). На графике обозначены области комфортного восприятия зрительной информации, зоны ориентирования и субмелких деталей. Кривые, показанные на рис. 1, представляют собой зависимости контрастной чувствительности органа зрения человека от пространственной частоты при различных уровнях яркостной адаптации (дневная и сумеречная). Не сложно видеть, что с понижением уровня яркостной адаптации органа зрения снижается общий ход кривой его контрастной чувствительности, тем самым уменьшается его способность воспринимать высокие пространственные частоты, т. е. мелкие

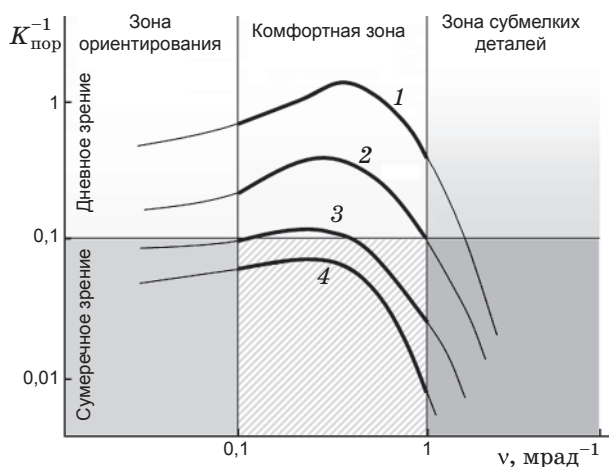


Рис. 1. ПЧХ ОЗ при дневном и сумеречном зрении для – яркостей адаптации. 1 – яркость 30 кд/м², 2 – 3 кд/м², 3 – 0,30 кд/м², 4 – 0,030 кд/м².

детали изображения. Также на графике виден экстремум функции контрастной чувствительности в комфортной зоне. Эти характеристики дали количественную основу для расчета изменений восприятия зрительной информации в условиях монокулярного ахроматического зрения.

Распределение яркости и цветности определяет создание светоцветовой среды обитания, которая может воздействовать на психофизиологическое состояние человека и создавать новые возможности “интеллектуального” и комфортного освещения с использованием оздоровительного эффекта.

Для разработки “интеллектуального” освещения на основе светодиодов было проведено исследование электрических и фотометрических характеристик светодиодных линеек с диодами белого цвета (разных цветовых температур: 3500 К и 7000 К) и светодиодных RGB-модулей с возможностью регулировки яркости и цветности.

В результате экспериментальных исследований была создана система регулируемых светильников. На основе светодиодов белого излучения был разработан светильник с регулируемой цветовой температурой. Использование RGB-светодиодов позволило разработать систему освещения с программным управлением и подстройкой под индивидуальные психофизиологические характеристики операторов.

Управляемый светильник на RGB-светодиодах показан на рис. 2. С целью удобства использования светильник был выполнен в виде настольной лампы на подпружиненном штативе. Плафон выполнен из металла для лучшего теплоотвода, что необходимо ввиду использования мощных светодиодных излучателей. Внутри плафона размещена плата с красными, зелеными и синими светодиодами, закрепленными на основании, выполняющем функции радиатора (теплоотвода). Так как данный светильник предполагается использовать в качестве настольного, что означает небольшое расстояние (не больше метра) между плоскостью излучения и освещаемой поверхностью, для смешения потоков излучения цветных светодиодов необходимо использовать интегратор или молочное стекло в зависимости от равномерности освещения. Очень важно, чтобы эти элементы были неселективными для наилучшей цветопередачи и точного расчета результирующей цветности. В нашем светильнике для этих целей было выбрано поликарбонатное стекло толщиной 3 мм марки PL340 фирмы Mashaon, уста-

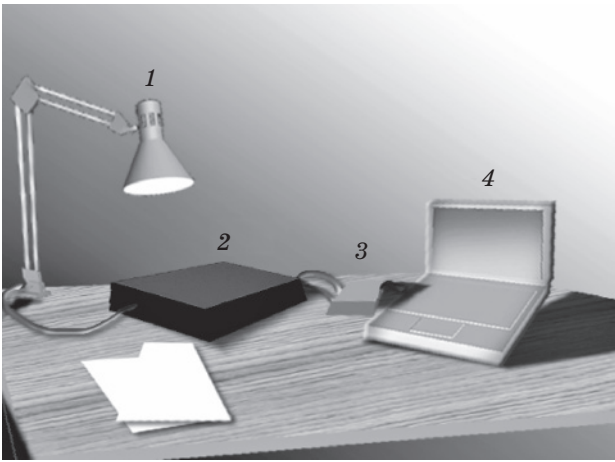


Рис. 2. Схема настольной осветительной установки на базе RGB-светодиодов. 1 – светодиодный светильник, 2 – блок управления и питания светильником, 3 – DMX-контроллер, 4 – компьютер с программой управления.

новленное на расстоянии 5 см от плоскости излучения светодиодов для оптимального смешения излучения.

В результате исследований было установлено, что на линейном участке вольтамперной характеристики одного типа светодиода можно получить около 200 градаций яркости (интенсивности), что дает широкие возможности в регулировании яркости белых светодиодных линеек, а также позволяет получать порядка 8 млн различных цветов в RGB-светильнике. Причем, область получаемых цветов перекрывает более 70% локуса цветов по диаграмме цветности XYZ МКО 1931 (рис. 3). Кривые, показанные на рис. 3, ограничивают области получаемых в эксперименте цветов: при добавлении на каждые три цветных светодиода одного светодиода белого теплого свечения (кривая 1), без добавления белых светодиодов (кривая 2), при добавлении на каждые три цветных светодиода одного светодиода белого холодного свечения (кривая 3). Расчет цветности показал, что при смешивании излучения цветных светодиодов различной интенсивности с излучением белых светодиодов можно добиться излучения соответствующей цветности источника типа Е и др. Кроме того, целесообразно использование в RGB-светильнике белых светодиодов, которые позволяют увеличивать световой поток и в более широких пределах регулировать яркость.

Для создания регулируемого светильника на основе RGB-светодиодов, учитывающего психо-

физиологическое состояние оператора, цветовая ПЧХ органа зрения оператора была выбрана в качестве объективного параметра, позволяющего определять наиболее комфортное в данный момент для человека освещение. Управление RGB-светильниками предусматривалось с помощью компьютерной программы, разработанной нами специально для данного эксперимента на языке программирования Visual Basic. Программа предусматривала тестирование оператора по пороговым характеристикам контрастной чувствительности органа зрения на заданной пространственной частоте, на трех координатах цветности в колориметрической системе RGB, где имелась возможность учета индивидуальных параметров оператора.

Для управления цветными светодиодами предварительно проводилась градуировка RGB-светильника, в результате которой были получены зависимости яркости светодиодов от подаваемого управляющего напряжения с компьютера посредством DMX-контроллера на драйвер питания светодиодов. DMX-контроллер является интерфейсом связи компьютера с перифе-

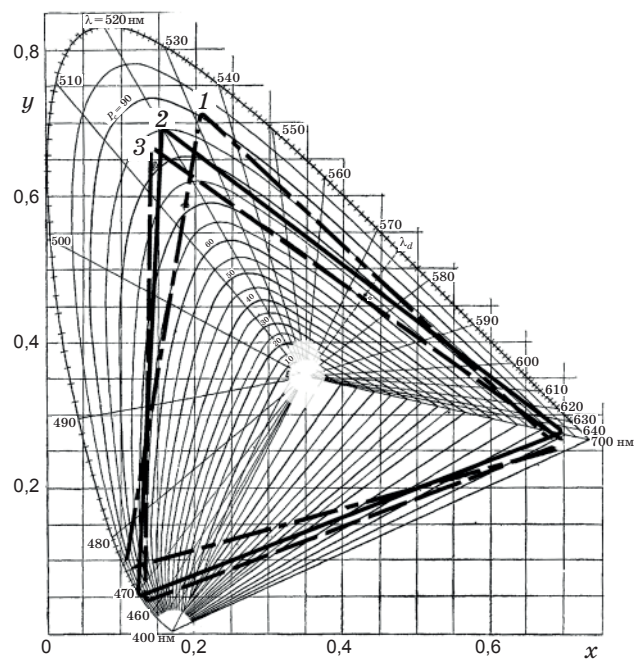


Рис. 3. Диапазон изменения цветности излучения RGB-светильника. 1 – цветность при добавлении на каждые три цветных светодиода одного светодиода белого теплого свечения, 2 – цветность без добавления белых светодиодов, 3 – цветность при добавлении на каждые три цветных светодиода одного светодиода белого холодного свечения.

рийными устройствами, в нашем случае драйвера питания светодиодов. Для каждого типа светодиодов оценку управляющего сигнала производили в делениях шкалы, помещенной на экране монитора компьютера. Диапазон делений шкалы 0–255.

Методика работы с управляемым светильником состоит из следующих этапов. При включении светильника в начале рабочего дня оператор проходит компьютерное тестирование по описанной ниже методике для определения контрастной чувствительности его органа зрения при наблюдении тестового изображения заданных цветов и пространственной частоты. Данные, полученные при первом тестировании оператора, записываются как $(S1_R, S1_G, S1_B)$, при последующих тестированиях – как $(S2_R, S2_G, S2_B)$.

После каждого тестирования, кроме первого, определяется изменение контрастной чувствительности $(\Delta S_R, \Delta S_G, \Delta S_B)$ для каждого цвета по сравнению с данными предыдущего тестирования

$$\begin{aligned} \Delta S_R &= \Delta S2_R - \Delta S1_R \\ \Delta S_G &= \Delta S2_G - \Delta S1_G \\ \Delta S_B &= \Delta S2_B - \Delta S1_B. \end{aligned} \quad (1)$$

Затем программно (автоматически) в соответствии с уравнениями (2) подбирается изменение яркости каждого типа светодиодов, необходимое для снижения влияния изменения контрастной чувствительности $(\Delta S_R, \Delta S_G, \Delta S_B)$

$$\begin{cases} \Delta S_R \Delta L_R + \Delta S_G \Delta L_G + \Delta S_B \Delta L_B = 0 \\ \sum_n (L_R + L_B + L_G) = L_{nRnBnG} = \text{const}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta L_R, \Delta L_G, \Delta L_B$ – разности яркостей на заданной яркости адаптации для различных цветов, $\Delta S_R, \Delta S_G, \Delta S_B$ – чувствительность на различных цветах, L_R, L_G, L_B – яркости светодиодов, n – количество светильников.

При регулировании яркости отдельных типов светодиодов результирующая яркость светильника остается неизменной и создает освещенность в соответствии со стандартными нормами СНиП РФ. После расчета необходимого изменения яркости по градуировочным зависимостям автоматически определяется изменение тока, подаваемого на светодиоды. Затем по рассчитанным параметрам проводится регулирование цветности светильника. Значения контрастной чувствительности $(S2_R, S2_G, S2_B)$ и яркости светодиодов $(L2_R, L2_G, L2_B)$ переписываются под именами $(S1_R, S1_G, S1_B)$ и $(L1_R, L1_G, L1_B)$.

При первом для данного оператора включении RGB-светильника автоматически выставляется белое излучение (в колориметрической системе RGB). Для этого в соответствии с предварительной градуировкой определяются токи для каждого типа R, G и B-светодиодов, при которых результирующая яркость светодиодов $(L1_R, L1_G, L1_B)$ будет иметь соответствующие координаты цветности.

При тестировании оператора определяется изменение контрастной чувствительности зрительной системы. Для этого на мониторе оператору предъявляются последовательно три одноцветных тестовых объекта в виде вертикальных полос с синусоидальным распределением яркости на равномерном фоне [10].

Для согласования цветности предварительно осуществляется градуировка монитора компьютера, на котором проводится тестирование, что необходимо для определения зависимости яркости и координат цветности монитора и светильника от задаваемых программно относительных единиц яркости и цвета.

Тестирование проводится на трех цветных тестовых объектах – красном, зеленом и синем, задающихся в стандартной системе компьютерных цветов RGB. Тестовый объект представляет собой вертикальную решетку с синусоидальным распределением яркости на равномерном фоне того же цвета. Яркость фона для трех объектов одинаковая, соответствующая условиям дневного зрения человека – не ниже 10 кд/м^2 . Пространственная частота (ν) тестового объекта, определяемая числом полос на единицу длины экрана монитора и расстоянием от монитора компьютера до оператора, рассчитывается по формуле

$$\nu = NR/l, \quad (3)$$

где N – число полос на экране монитора, R – расстояние от монитора до оператора, l – ширина экрана.

Для увеличения динамического диапазона тестирования устанавливается высокая пространственная частота.

Тестирование проводится при включенном RGB-светильнике, цветность излучения которого должна быть установлена в соответствии с цветностью тестового изображения. Остальные источники света должны быть выключены. RGB-светильник устанавливается таким образом, чтобы освещая рабочее место оператора и монитор, не создавать бликов на мониторе. Светильник при этом создает фоновые условия яркости.

Оператор при тестировании должен сидеть в удобном положении на постоянном расстоянии от монитора. В течение 5 мин он наблюдает тестовое изображение с максимальным контрастом, адаптируясь на форму и цвет объекта.

Затем по методу пределов [10, 11] определяют амплитуду синусоидального распределения яркости тестовых полос (на фоне с постоянной яркостью) на появление и исчезновение. Для повышения достоверности проводят не меньше 5 опытов. Затем рассчитывается пороговая яркость обнаружения тестового объекта ($L_{пор}$) как среднеарифметическая яркость появления и исчезновения. Расчет яркости для каждого заданного цвета проводят в абсолютных единицах (кд/м^2) по результатам градуировки. После завершения серии измерений на одном цвете автоматически изменяется цветность RGB-светильника и тестового изображения, после чего оператор продолжает тестирование на следующем.

После проведения измерений рассчитывается цветовая контрастная чувствительность как отношение яркости фона к рассчитанной пороговой яркости обнаружения тестового объекта. Полученные значения записываются в файл данных регулируемого светильника

$$S = L_{\Phi} / L_{пор}, \quad (4)$$

где $L_{пор}$ – пороговая яркость обнаружения тестового объекта, L_{Φ} – яркость фона тестового объекта, складывающаяся из фоновой яркости монитора и фоновой яркости RGB-светильника.

По описанной выше методике для определения взаимосвязи зрительных и незрительных процессов, определяющих психофизиологическое состояние человека, были проведены экспериментальные исследования. Результаты исследований определили взаимосвязь индивидуальных физиологических параметров и ПЧХ органа зрения наблюдателя.

Перед проведением исследований на оператора одевался комплект датчиков, измеряющих отдельные физиологические функции (пульс, частота и глубина дыхания, электрокожное сопротивление, температура, электрокардиограмма и др.). Затем оператор 5 мин адаптировался в надпороговых условиях наблюдения на высокую пространственную частоту тест-объекта ($20,8$ цикл/град) и заданную цветность изображения при определенной яркости адаптации (15 кд/м^2 , дневное зрение). В эксперименте принимали участие 6 операторов с нормальным зрением в возрасте 20–25 лет. Полученные дан-

ные показали, что контрастная чувствительность органа зрения зависит от цвета предъявляемого оператору объекта (рис. 4). У пяти операторов максимум контрастной чувствительности наблюдается на синем цвете. В работе [7] показано, что для нейронов зрительной системы наиболее информативной является разность получаемых сигналов. Поэтому были проанализированы возможные вариации разности физиологических параметров, измеренные при наблюдении оператором трех различных по цвету тестовых объектов. Разности параметров определялись для заданных цветностей: А – предъявление красного тестового объекта, В – синего, С – зеленого. В проведенных ранее исследованиях было установлено, что при введении человека в стрессовое состояние его пульс ускоряется примерно на 10 ударов в минуту [11]. При наблюдении тестовых объектов разных цветов пульс у операторов изменялся в среднем от 1 до 5 ударов в минуту. Это говорит о существенном влиянии на человека цветности освещения. Также было выявлено, что ход кривых изменения пульса от наблюдаемого цвета подобен для 3-х операторов, что показывает наличие взаимосвязи контрастной чувствительности и пульса человека. Для оценки состояния человека были определены такие физиологические параметры, как частота и глубина дыхания. По графикам, приведенным на рис. 5, видно, что предъявляемое изображение оказывает на исследуемые физиологические параметры влияние, которое определяется цветностью получаемого изображения и индивидуальными особенностями реагирования человека. Анализ

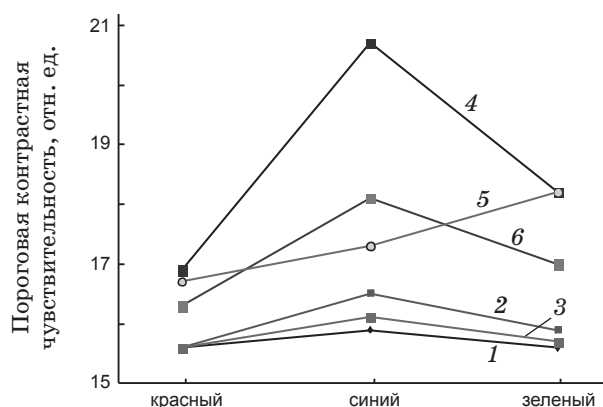


Рис. 4. Пороговая контрастная чувствительность в зависимости от цвета тестового изображения для 6 операторов, принимавших участие в исследованиях.



Рис. 5. Зависимость частоты дыхания от контрастной чувствительности для 6 операторов. А – предъявление красного тестового объекта, В – синего, С – зеленого.

приведенных данных показал, что из трех использованных в эксперименте цветов синий цвет воспринимался практически всеми операторами как наиболее комфортный, на нем наблюдалось увеличение контрастной чувствительности и снижение частоты дыхания. Это можно объяснить нахождением операторов в экстремальных психологических условиях, таких как замкнутое пространство с повышенной температурой (моделирование ситуации на борту космической станции). Для взрослого здорового человека в комфортных условиях частота дыхательных движений составляет 10–18 раз в минуту. В состоянии повышенного напряжения частота дыхания может увеличиваться. Авторами статьи было выявлено, что операторы разделились на две группы реагирования. Первая – с частотой дыхания в диапазоне 12–16 мин⁻¹ (нормальное состояние); причем у двух из трех операторов в этой группе высокая контрастная чувствительность. Вторая – 20–24 мин⁻¹ (напряженное состояние); в этой группе у двух из трех операторов низкая контрастная чувствительность. Также была получена зависимость разности значений кожного сопротивления, измеренного в период адаптации и обнаружения тестового изображения, от контрастной чувствительности. Ход полученных кривых подобен. У четырех операторов (2, 3, 4 и 6) отчетливо виден всплеск реакции на синем цвете, что свидетельствует о повышении возбуждения головного мозга. Было обнаружено воздействие цвета предъявляемого тестового изображения на биоэлектрическую активность мышц. Полу-

ченные данные отчетливо показывают, что у трех операторов (2, 3 и 5) при синем цвете происходит увеличение измеряемого параметра, что говорит о повышении мышечного напряжения. У других наблюдателей (6 и 4) происходит обратная реакция. Все это можно объяснить индивидуальными особенностями восприятия цветов.

Из проведенных исследований следует, что разработанный светодиодный RGB-светильник с высокой светоотдачей и возможностью управления и регулирования яркости и цветности позволяет создать систему “интеллектуального” освещения с возможностью настройки на индивидуальные психофизиологические параметры человека. Светильник может быть использован для внутреннего освещения межпланетной космической станции, в офисных помещениях, в дошкольных и школьных учреждениях, в комнатах релаксации, в специальных и операторских помещениях. Исследования показали, что использование психологического теста на основе пространственно-частотной цветовой контрастной чувствительности позволяет согласовать индивидуальные параметры состояния человека на основе программы управления, что открывает возможность задавать параметры яркости и цветности на регулируемом светильнике. Регулирование параметров яркости и цветности создает комфортную световую среду с учетом индивидуальных параметров. Кроме того, светильник допускает устанавливать освещение по зонам работы и отдыха, общего и аварийного характера, что особенно важно для освещения внутренних помещений космических кораблей.

В результате проведенных исследований была разработана и создана установка, смонтированная на стенде ИМБП АН РФ с целью проведения экспериментов по программе MAPC 500 [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Фиш И. Свет и здоровье. М.: ВИГМА, 2001. 40 с.
2. Ренчлер И., Херцбергер Б., Эпстайн Д. Красота и мозг. Биологические аспекты эстетики. М.: Мир, 1995. 335 с.
3. Гвоздев С.М., Романов С.С. Исследование пороговых характеристик органа зрения при повышенном давлении // Светотехника. 1986. № 6. С. 17–18.
4. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 240 с.
5. Брейнард Г.К., Гликман Г.Л. Биологическое влияние света на здоровье и поведение человека // Светотехника. 2004. № 7. С. 4–8.

6. *Гвоздев С.М.* Визуальное восприятие информации и методика восстановления зрения детей школьного возраста // Планета детства. 2000. № 1. С. 42–44.
 7. *Логвиненко А.Д.* Чувственные основы восприятия пространства. М.: МГУ, 1985. 224 с.
 8. *Кларк Н.Г.* Свет и здоровье // Светотехника. 1999. № 5. С. 37–38.
 9. *Шамшинова А.М., Белозеров А.Е., Шапиро В.М.* Новый метод исследования контрастной чувствительности в клинике глазных болезней // Вестник офтальмологии. 1997. № 1. С. 22–25.
 10. *Гвоздев С.М., Садовникова Н.Д.* Расчет пороговых характеристик восприятия при визуализации цветных изображений наблюдаемых объектов // Труды IX международной конф. “Оптические методы исследования потоков”. М.: МЭИ, 2007. С. 264–267.
 11. *Богатова Р.И., Гвоздев С.М.* Изучение пороговой контрастной чувствительности органа зрения и психофизиологических функций на основе цветовой пространственно-частотной характеристики // Матер. межд. конф. “Системы жизнеобеспечения как средство освоения человеком дальнего космоса”. М., 2008. 16 с.
-