

DOI: 10.18721/JPM.12306

УДК 574.24, 628.938

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СИНЕГО СВЕТА НА ФУНКЦИЮ ВОСПРИЯТИЯ ВРЕМЕНИ У ЛИЦ С РАЗНЫМ ТИПОМ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ**

**А.В. Аладов<sup>1</sup>, Д.Н. Берлов<sup>2</sup>, В.П. Валюхов<sup>3</sup>,  
О.Л. Власова<sup>3</sup>, А.Л. Закгейм<sup>1</sup>, А.А. Панихина<sup>2</sup>, А.Э. Фотиади<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

С помощью экспериментальной установки на основе светодиодной, динамически управляемой системы освещения исследовалось влияние светового воздействия монохроматическим синим светом (длина волны – около 460 нм) на восприятие человеком коротких интервалов времени свечения, в зависимости от преобладания в его организме активности симпатического или парасимпатического отделов автономной нервной системы. Испытуемые отмеряли длительность минуты до и после светового воздействия белым (контрольная группа) или монохроматическим синим светом. Влияние синего света проявилось в преобладании возбудимости симпатического отдела автономной нервной системы. Выявлена тенденция к укорочению длительности субъективной минуты после светового воздействия. Аналогичное воздействие белым светом не привело к изменениям соответствующих показателей. Результаты исследования позволили предположить, что индивидуальный эффект влияния синего света на функцию восприятия времени может быть опосредован через регуляцию сердечного ритма.

**Ключевые слова:** световое воздействие, восприятие времени, светодиод, синий свет, динамически управляемый источник

**Ссылка при цитировании:** Аладов А.В., Берлов Д.Н., Валюхов В.П., Власова О.Л., Закгейм А.Л., Панихина А.А., Фотиади А.Э. Экспериментальная установка для исследования влияния синего света на функцию восприятия времени у лиц с разным типом вегетативной регуляции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 3. С. 78–91. DOI: 10.18721/JPM.12306

## **EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDYING THE BLUE LIGHT EFFECT ON SENSE OF TIME AMONG THE PERSONS WITH DIFFERENT TYPE OF VEGETATIVE REGULATION**

**A.V. Aladov<sup>1</sup>, D.N. Berlov<sup>2</sup>, V.P. Valyukhov<sup>3</sup>,  
O.L. Vlasova<sup>3</sup>, A.L. Zakgeim<sup>1</sup>, A.A. Panihina<sup>2</sup>, A.E. Fotiadi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> The Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

The effect of blue illumination (wavelength is about 460 nm) on human perception of short-time intervals of light, depending on a person's predominance of activity of the sympathetic or

parasympathetic parts of the autonomic nervous system has been studied using an experimental setup based on the LED dynamically controlled lighting system. The persons measured the duration of a minute before and after exposure to white (a control group) or monochromatic blue light. The effect of blue light was manifested in the predominance of excitability of the sympathetic part of the autonomic nervous system. The same persons showed a tendency to shorten the duration of the subjective minute after the light exposure. A similar effect of white light did not lead to significant changes in the same characteristics. The results of the study suggest that the individual effect of blue light on the function of time perception can be mediated through the regulation of the heart rate.

**Keywords:** light exposure, sense of time, LED, blue light, dynamically controlled light source

**Citation:** Aladov A.V., Berlov D.N., Valyukhov V.P., Vlasova O.L., Zakgeim A.L., Panihina A.A., Fotiadi A.E., Experimental setup for studying the blue light effect on sense of time among persons with different type of vegetative regulation, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (3) (2019) 78–91. DOI: 10.18721/JPM.12306

### Введение

Свет — это один из экологических факторов, воздействующих на организм человека. И естественный, и искусственный свет важен не только для зрительного восприятия, но и для состояния организма. Влияние света включает как кратковременное воздействие, которое выражается в быстром изменении функциональных показателей, так и длительное, влияющее на биологические ритмы (они связаны, прежде всего, с естественными колебаниями уровня освещенности — циркадианными и циркануальными). В последние годы выяснено, что, во многом, механизм длительного воздействия связан с активацией ретиногипоталамического тракта, который начинается от светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки глаза, содержащих зрительный пигмент меланопсин [1 – 3]. Информация об уровне освещения передается в супрахиазматические ядра гипоталамуса, где корректирует ход циркадианных ритмов [4], а также через дальнейшие морфологические пути влияет на уровень секреции мелатонина в эпифизе и уровень активации коры головного мозга [5, 6]. Этот механизм объясняет влияние параметров освещения на уровень бодрствования и активности [7, 8], когнитивные функции [5, 9], эмоции [10] и многое другое. Отмечается, что разработка и использование современных источников освещения должны учитывать эти закономерности [11].

Можно предположить, что в зависимости от параметров освещения может меняться и функция оценки человеком времени, однако в литературе практически отсутствуют данные на эту тему. Показано только, что восприятие времени меняется при измене-

нии состояния организма [12 – 14]. Предполагается, что в основе функции оценки временных интервалов может лежать учет информации от эндогенных таймеров [15, 16]. Поэтому изменение физиологических ритмических процессов (например, частоты сердечных сокращений (ЧСС)), может корректировать ход «внутренних часов». В случае повышения тонуса симпатической нервной системы (например, при стрессе и волнении) увеличение ЧСС должно приводить к субъективному ускорению времени, а замедление пульса — к замедлению времени.

Световое воздействие в этом случае может оказывать влияние на функцию восприятия времени либо через изменение тонуса коры головного мозга [6], либо через изменение работы сердца [17, 18]. Тогда свет с длиной волны, соответствующей пику чувствительности меланопсиносодержащих рецепторов, может произвести выраженный эффект [3]. Воздействие подобного рода рекомендовано, например, для лечения сезонных аффективных расстройств, когда менее яркий (освещенность — 750 люкс) белый свет, но насыщенный синей составляющей, дает столь же эффективный терапевтический эффект, что и традиционно используемый яркий белый свет (освещенность — 10 000 люкс) [19, 20]. Аналогично, как установлено опытным путем, синий светодиодный свет ( $\lambda = 468$  нм) оказывал заметное действие на подавление синтеза мелатонина у лошади даже при небольшом уровне освещенности (10 люкс) [21].

Известно, что пик чувствительности меланопсиносодержащих рецепторов соответствует длине волны  $\lambda \approx 480$  нм [21].

В связи с вышеизложенным, целью исследования была оценка влияния синего

света на восприятие длительности минутного интервала времени.

#### Методика эксперимента

Исследование выполнялось на 18 практически здоровых волонтерах возрастом от 18 до 28 лет (12 и 6 лиц женского и мужского пола соответственно). Опыты проводилось преимущественно в вечернее время, в состоянии психического и физического покоя участников. Семнадцать из восемнадцати человек спустя 3 – 4 недели участвовали в эксперименте повторно, с тем отличием, что синий свет как воздействующий фактор заменялся белым светом. Таким образом, 17 человек составили контрольную группу. В процессе исследований ее разделили на две подгруппы (далее они фигурируют как 1-я и 2-я группы). Подробное описание процедуры исследования волонтеров будет представлено ниже.

**Световое воздействие.** Осуществлялось белым светом (в течение 20 мин) с помощью светодиодного, динамически управляемого источника освещения с широким диапазоном коррелированных цветовых температур (КТЦ) ( $T_c = 2800 - 10000$  К), при высоком общем индексе цветопередачи ( $R_a > 90$ ). Прибор был разработан в Научно-технологическом центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (Санкт-Петербург) [22, 23] для обеспечения экологичной световой среды, оптимальной для жизнедеятельности человека в жилых и производственных помещениях. Данная разработка позволяет, в частности, воспроизводить освещение, отвечающее естественному суточному циклу, задающему биологические циркадные ритмы. Эта функция достигается плавным изменением цветовой температуры.

Для обеспечения высоких индексов цветопередачи светодиодного источника используется набор светодиодов (СД): красный (длина волны – 630 нм), синий и зеленый (длины волн – 460 и 520 нм), белый теплый  $W_w$  (КТЦ – 2800 К), белый холодный  $W_c$  (КТЦ – 8000 К).

Два последних компонента (люминофорные светодиоды) создают основной световой поток, три первых (монохроматические светодиоды) обеспечивают плавную регулировку цветовой температуры в широком

диапазоне и поддержание высоких значений всех частных индексов цветопередачи  $R_1 - R_{14}$  [22].

Значения КТЦ составили (в градусах К): 2800, 3500, 4000, 5000, 6500 и 10000. Оптическая система обеспечила высокий коэффициент передачи излучения от СД к выходному окну светильника, заданное пространственное распределение излучения, а также однородность по цвету в дальнем и ближнем полях, т. е. хорошее смешение излучения отдельных СД-матриц. Решены задачи равномерного и широкого углового распределения и гомогенизации цветовых характеристик по площади излучающей поверхности и углу [22].

Программное обеспечение, пульт и система дистанционного управления источником освещения позволяют создавать по радиоканалу требуемое освещение в радиусе до 35 м, задавать любые временные алгоритмы по интенсивности и цветовой температуре освещения. Синий свет создается излучением светодиодов на длине волны 460 нм, остальные светодиоды при этом отключаются, но система управления светом остается в рабочем состоянии.

В работе [24] авторами настоящей статьи представлены результаты исследования биологического воздействия различных светодиодных источников света, а именно – оценка их влияния на концентрацию мелатонина в крови испытуемых при одном и том же зрительном эффекте (КТЦ и освещенности) по известной функции  $V(\lambda)$  – относительной спектральной световой эффективности и функции  $B(\lambda)$  – спектра биологического действия (подавления секреции мелатонина) (см. [24, рис. 3,6]). Как следует из указанного рисунка статьи [24], максимум интенсивности  $B(\lambda)$  лежит в диапазоне длин волн 446 – 477 нм, т. е. сдвинут примерно на 200 нм влево от максимума  $V(\lambda)$  и совпадает с максимумом сильной голубой полосы спектра измерения источников света на основе белых люминофорных СД.

Из результатов расчета биологического эквивалента, представленных в статье [24], следует, что из белых СД наименее опасными, с точки зрения подавления мелатонина, являются СД с КТЦ не выше 3500 – 4000 К, у которых доля излучения в сине-голубой части спектра не больше, чем в желто-оранжевой. Белые СД с КТЦ выше 4000 К представляют определенную опасность в суточные часы, ответственные за интенсив-

ный синтез мелатонина у человека.

В рамках настоящего исследования, КТЦ при излучении белого света (нейтральный белый) составляет 4000 К. Площадь под спектральными кривыми белого света с температурами 2800, 3500 и 4000 К в диапазоне длин волн  $\lambda = 400 - 800$  нм существенно превышает (более чем на порядок) такую площадь для синего света с длинами волн  $\lambda = 460 - 480$  нм. Это означает, что влияние синей части спектра белого света на функциональное состояние человека не должно быть столь же эффективным, как при воздействии монохроматического излучения синего светодиода с  $\lambda \approx 460$  нм. Данное утверждение подтверждено экспериментально.

**Оценка временных интервалов.** Тест «Индивидуальная (субъективная) минута» является классической методикой на восприятие времени, хорошо известной в экспериментальной психологии. Точность отмеривания индивидуальной минуты, согласно представлению исследователей, связана с психофизиологическими аспектами времени, т. е. с работой биологических часов [14]. Разные люди, как правило, имеют тенденцию переоценивать или недооценивать временной интервал, равный астрономической минуте. При этом индивидуальная минута есть относительно устойчивая величина, которая отражает особенности индивидуума в оценке длительности времени.

**Оценка функций организма.** Изменение функционального состояния организма волонтера оценивалось по показателям variability и спектра сердечного ритма. Анализ variability сердечного ритма (ВСР) основан на определении последовательности интервалов  $R - R$  электрокардиограммы и дает информацию о влиянии вегетативной нервной системы на работу сердца. С помощью аппаратно-программного комплекса «Поли-Спектр» (ООО «Нейрософт», г. Иваново, Россия) записывалась компьютерная ЭКГ в трех стандартных отведениях (I, II, III), в течение 5 мин, в положении волонтера сидя, при ровном дыхании [25, 26]. Для анализа данных использовались значения ЭКГ, записанные во II стандартном отведении. Используемые в работе условные обозначения показателей спектрального анализа ВСР представлены в соответствии с международными стандартами его оценки с учетом значений ориентировочных нормативов [27]. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке.

Спектральный анализ дает объективную количественную оценку функционального статуса систем регуляции ВСР по следующим характеристикам:

- общая мощность (total power) спектра нейрогуморальной регуляции –  $TP, (mc)^2$ ;
- вклад в указанный спектр быстрых высокочастотных колебаний –  $HF, 16 - 0,4$  Гц),

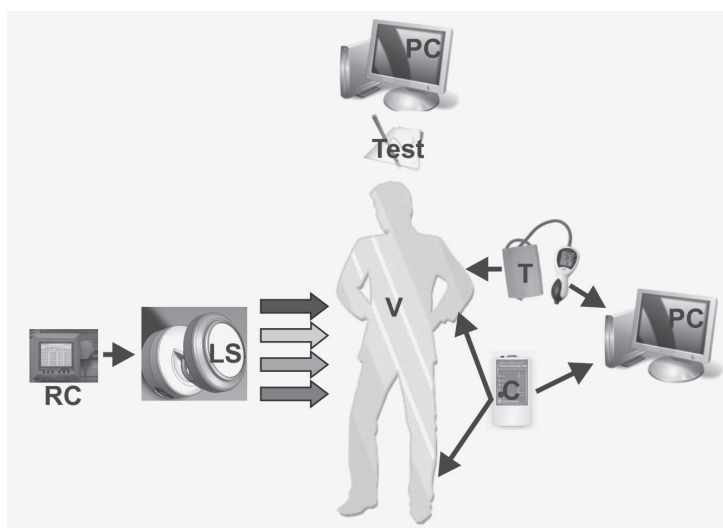


Рис. Общая схема экспериментальной установки для исследования влияния синего света на функцию восприятия времени у лиц с разным типом вегетативной регуляции:

RC – пульт дистанционного управления светильником, LS – динамически управляемый источник света, V – волонтер, Test – тест на субъективную минуту, C – кардиограф, T – тонометр, PC – компьютер

которые характеризуют активность парасимпатического отдела автономной нервной системы (АНС);

вклад медленных низкочастотных колебаний – LF-компонент – как показатель активности симпатического отдела;

вклад сверхнизкочастотных колебаний – VLF, менее 0,05 Гц, отражающих гуморально-метаболические и церебральные эрготропные влияния на модуляцию сердечного ритма.

По отношению LF/HF мы оценивали симпато-парасимпатический баланс тонуса отделов АНС в начале и в конце эксперимента.

Для оценки симпато-парасимпатического баланса использовались следующие показатели ВСР:

стандартное отклонение интервалов  $R - R$  (SDNN);

амплитуда моды (MA);

индекс вегетативного равновесия (VEI) [26].

Дополнительно с помощью электрического тонометра измерялись показатели артериального давления, вычислялся вегетативный индекс Кердо (ВИК).

Каждому испытуемому предлагался личностный опросник Айзенка ЕРІ для определения уровня экстраверсии и нейротизма.

**Процедура исследования.** Опишем эту процедуру подробно. Сначала у каждого волонтера регистрировали значение артериального давления. Затем в течение 5 мин (300 с) производили запись электрокардиограммы для последующего анализа вариабельности сердечного ритма и определения доминирующего регуляторного влияния симпатического или парасимпатического отделов АНС на момент начала проведения эксперимента. Следующий шаг – испытуемому с помощью специальной компьютерной программы предлагалось отмерить «индивидуальную (субъективную) минуту», а именно – нажатием клавиши обозначить начало временного интервала, выждать 60 с, наблюдая за своими субъективными ощущениями, и обозначить конец временного интервала повторным нажатием клавиши. Испытуемым разрешалось отмерять минуту любым выбранным способом, включая счет про себя. При этом ставилось условие, что при повторях теста данный способ должен быть идентичным первому. Доброволец отмерял «индивидуальную минуту» дважды, затем в течение 20 мин на него оказывалось

воздействие синим светом (длина световой волны составляла примерно 440 – 485 нм, освещенность организма – 150 – 200 лк). Одновременно с этим воздействием испытуемому предлагался опросник Айзенка для определения уровня нейротизма. После светового воздействия выполнялись первые три шага в обратном порядке: тест «индивидуальная (субъективная) минута, запись ЭКГ в течение 5 мин, измерение артериального давления. Для контрольной группы ход эксперимента отличался лишь заменой синего света белым дневным с цветовой температурой 4000 К, аналогичным по длительности и интенсивности воздействия.

Полученные индивидуальные данные статистически обрабатывались с помощью методов параметрической статистики, с расчетом среднеквадратичного и среднего отклонений. Достоверность различий сравниваемых показателей определялась по  $t$ -критерию Стьюдента.

### Результаты и их обсуждение

Воздействие синего света привело к весомым перестройкам вегетативного баланса в организмах испытуемых. Значения показателей общей мощности спектра ЭКГ и индекса вегетативного равновесия существенно изменялись, по сравнению с фоновыми. Для показателя TP индивидуальные изменения после воздействия составили от – 91 до +130 %, а в среднем по модулю – 45 %. Для показателя VEI индивидуальные изменения после воздействия были от – 68 до +128 %, в среднем по модулю они составляли 43 %. Однако направленность сдвигов была разнородной, в связи с чем среднее значение этих показателей после светового воздействия достоверно не изменилось ( $p > 0,05$ ).

Известно, что усредненные значения TP характеризуют суммарную активность вегетативного воздействия на кардиоритм: активация вагуса ведет к повышению величины TP, повышение активности симпатического отдела вегетативной нервной системы вызывает противоположный эффект [25]. Можно было предположить, что полученная разнородность изменений связана с различными типами вегетативного реагирования. На основе выдвинутого предположения были сформированы две группы испытуемых.

У волонтеров 1-й группы (два лица мужского пола и девять женского) значение средней величины TP существенно снижалось ( $p < 0,05$ ) после светового воздействия;

это указывало на преобладание активности парасимпатического отдела АНС в начале эксперимента и сдвиг вегетативного баланса в сторону преобладания симпатического отдела АНС в конце эксперимента.

У испытуемых 2-й группы (четыре лица мужского пола и три женского) наблюдалась противоположная картина: среднее значение TP несколько повышалось, что, соответственно, указывало на повышение активности парасимпатического отдела АНС после светового воздействия.

Аналогичную закономерность демонстрировали и другие показатели, оценивающие вегетативный баланс, однако выраженность сдвигов в таком случае оставалась преимущественно на уровне тенденции.

У испытуемых 1-й группы увеличивалось отношение LF/HF – интенсивности низкочастотных колебаний к интенсивности высокочастотных, снижалось (с уровнем значимости различий  $p = 0,07$ ) значение SDNN (мс), увеличивалось значение MA (%), увеличивалось (с  $p < 0,05$ ) значение VEI (у.е.). Все эти показатели отражают сдвиг вегетативного баланса в сторону преобладания ак-

тивности симпатического отдела АНС.

У волонтеров 2-й группы те же показатели демонстрировали изменения противоположной направленности, а именно: значение отношения LF/HF уменьшалось, значение SDNN (мс) повышалось, MA (%) снижалось и значение VEI (у.е.) достоверно уменьшалось ( $p < 0,05$ ). Это, в свою очередь, свидетельствует о сдвиге вегетативного баланса в сторону преобладания активности парасимпатического отдела АНС.

Для показателей, к которым не приводится статистический уровень значимости различий  $p$ , характерна лишь тенденция к изменению в указанном направлении. Численные значения всех описанных параметров приведены в табл. 1 (верхние числа в клетках таблицы).

Среднее значение индивидуальной минуты после воздействия синим светом в целом по выборке не изменилось. Однако в выделенных нами группах характер изменений имел противоположное направление. Прослеживается связь между изменением длительности субъективной минуты после воздействия синим светом и доминирующей

Таблица 1

**Сравнение результатов световых воздействий на две группы испытуемых людей**

Показатель	Значение показателя			
	1-я группа		2-я группа	
	До воздействия	После него	До воздействия	После него
TP, (мс) <sup>2</sup>	5043,6 ± 2078,69	2539,6 ± 1047,11	3914,3 ± 1660,90	5056,3 ± 1321,22
	3845,5 ± 2309,00	4340,8 ± 2554,36	4376,9 ± 1826,69	3810,3 ± 1767,47
LF/HF	3,70 ± 2,80	5,20 ± 3,96	5,50 ± 2,42	3,50 ± 2,02
	4,10 ± 2,67	4,90 ± 2,55	5,70 ± 2,28	4,30 ± 1,62
SDNN, мс	61,30 ± 15,16	49,50 ± 9,79	61,10 ± 13,59	68,30 ± 7,96
	57,70 ± 17,90	62,50 ± 18,20	63,30 ± 14,61	60,70 ± 15,39
MA, %	35,00 ± 8,09	41,40 ± 7,50	35,60 ± 4,71	26,40 ± 7,88
	35,20 ± 12,36	38,50 ± 11,29	34,90 ± 7,79	40,60 ± 9,97
VEI, у.е.	92,80 ± 32,43	149,30 ± 61,58	123,60 ± 39,96	56,80 ± 18,04
	151,20 ± 98,14	117,00 ± 53,00	130,60 ± 84,33	149,60 ± 92,76

Примечания. 1. Представлены данные по изменению значений спектрального анализа вариабельности сердечного ритма и вариационной пульсометрии по Р.М. Баевскому. 2. Уровень статистической значимости различий по  $t$ -критерию Стьюдента  $p < 0,05$ ; 3. Верхние и нижние числа в клетках таблицы относятся к результатам облучения испытуемых синим и белым светом соответственно.

Обозначения: TP – общая мощность спектра нейрогуморальной регуляции, LF/HF – отношение интенсивности низких частот к интенсивности высоких, SDNN – стандартное отклонение интервалов  $R - R$ , MA – амплитуда моды, VEI – индекс вегетативного равновесия.

активностью симпатического или парасимпатического отделов АНС на начало и конец эксперимента. В 1-й группе (после светового воздействия вегетативный баланс сдвинулся в сторону преобладания активности симпатического отдела АНС) наблюдается тенденция к укорочению субъективной минуты в усредненных значениях на 10 с (табл. 2). Во 2-й группе (после светового воздействия преобладает активность парасимпатического отдела АНС) длительность субъективной минуты практически не меняется. Стоит добавить, что в первую группу попали все участники эксперимента, уровень нейротизма которых оказался выше средних значений. Из этих данных следует предположение, что лица женского пола оказались чувствительнее к воздействию. У них же есть и тенденция к более высокому уровню нейротизма ( $13,25 \pm 3,21$  против  $9,33 \pm 2,78$ ). По уровню интро (экстра) версии различия между группами – незначительные.

При повторном эксперименте, в котором участвовали те же испытуемые, световое воздействие синим светом было заменено воздействием белым дневным. За испытуемыми была сохранена принадлежность к группам, выделенным после первого этапа исследо-

вания. Заметных сдвигов вегетативного баланса на конец эксперимента, по сравнению с началом, в этом случае отмечено не было (см. табл. 1, нижние числа в клетках).

Анализ показал, что фоновые измеряемые показатели являются устойчивыми. Каких-либо статистически значимых различий между выбранными показателями ВСР у испытуемых до светового воздействия между первым и повторным экспериментами не обнаружено.

Существенного изменения длительности субъективной минуты после воздействия дневным белым светом также не наблюдалось ни в 1-й, ни во 2-й группах (табл. 2, нижние числа в клетках).

Полученные данные показывают, что, по крайней мере, на часть испытуемых (1-я группа), синий свет оказал выраженное тонизирующее действие, сдвигая вегетативный баланс в сторону активности симпатического отдела АНС. Именно в этой группе наблюдалось выраженное уменьшение длительности индивидуальной минуты (на 20,8 %). Это согласуется с имеющимися данными, которые показывают повышение тонуса коры головного мозга [6], усиление уровня бодрствования [5, 8] при воздействии сине-

Таблица 2

**Изменение длительности субъективной минуты в выделенных группах до и после световых воздействий**

Показатель	Значение показателя		
	1-я группа	2-я группа	
Возраст, лет	22,00 ± 1,60	22,30 ± 2,12	
Уровень нейротизма, у.е.	$\frac{14,00 \pm 3,67}{13,80 \pm 4,04}$	9,40 ± 2,49	
Уровень интро (экстра) версии, у.е.	$\frac{14,60 \pm 4,12}{15,50 \pm 3,30}$	15,70 ± 2,53	
Длительность субъективной минуты, с	до воздействия	$\frac{65,80 \pm 16,96}{60,80 \pm 15,04}$	$\frac{60,60 \pm 9,63}{65,10 \pm 8,63}$
		после него	$\frac{55,30 \pm 8,14}{64,60 \pm 8,40}$

Примечания. 1. Верхние и нижние числа в клетках таблицы относятся к результатам облучения испытуемых синим и белым светом соответственно. Если числа одинаковы, то дано одно значение.

2. 1-я группа состояла из двух лиц мужского пола и девяти женского, 2-я группа – из четырех лиц мужского пола и трех женского (данные табл. 1 и 2 относятся к одинаковым группам).



го света ( $\sim 440 - 485$  нм) через ганглиозные светочувствительные клетки сетчатки и супрахиазматические ядра гипоталамуса. Также наши данные подтверждают возможность влияния характеристик освещения на параметры variability сердечного ритма [17, 18]. Однако среднее значение частоты пульса в результате синего светового воздействия не проявило достоверных изменений. Это означает, что наши данные, связанные с изменением длительности индивидуальной минуты в 1-й группе, нельзя объяснить в рамках гипотезы о частоте пульса как возможного эндогенного «пейсмейкера», задающего скорость течения субъективного времени [15, 16]. С учетом полученных данных можно предположить, что естественным эндогенным «пейсмейкером», который используют для субъективного отмеривания временных интервалов, выступает некий иной физиологический процесс, изменяющийся в соответствии с типом вегетативной регуляции. На другую часть испытуемых людей (2-я группа) синий свет такого действия не оказал. Напротив, в ходе эксперимента вегетативный баланс отчасти сместился к преобладанию парасимпатического отдела АНС. Этот результат можно объяснить не только наличием специфического парасимпатотонического эффекта монохроматического синего света для данной группы, но и отсутствием тонизирующего влияния в сочетании с естественным ухудшением функционального состояния испытуемых к концу эксперимента вследствие утомления или монотонии. Если принять такое объяснение, то естественно предположить, что и тонизирующее действие синего монохроматического света на 1-ю группу могло бы быть выражено сильнее, чем демонстрируют полученные экспериментальные данные, поскольку оно помогло преодолеть возможное ухудшение функционального состояния.

Разнородность полученных результатов можно также объяснить другими факторами, которые не учитывались в данном эксперименте, в частности субъективным эмоциональным отношением к синему свету. Цветовые предпочтения взрослых людей зависят как от энергетических характеристик цвета, так и от информационной составляющей цветового воздействия. Предпочтительными для взрослых [28] оказались три цвета: синий, зеленый и красный. Синий – цвет моря и неба – у многих ассоциируется с покоем, поэтому разница в реагировании,

возможно, связана с функционированием разных систем – корковой и подкорковой, а тип перестроек активности отделов АНС связан с их балансом. В этом плане можно указать работу [29], в которой показано, что тип вегетативного регулирования во многом определяет характер ответной реакции организма на воздействие. У симпатотоников и нормотоников параметры работы сердца и когнитивные функции перестраивались после умственной нагрузки (30-минутное решение задач) в противоположную сторону, по сравнению с парасимпатотониками. Дальнейшие исследования могут осуществить экспериментальную проверку выдвинутых предположений.

### Заключение

В ходе настоящей работы было исследовано влияние различных режимов освещения на восприятие человеком коротких временных интервалов. В частности, изучено действие синего света предположительно через ганглиозные меланопсиносодержащие клетки сетчатки на циркадианные ритмы, определяемые функциональной системой головного мозга – внутренними биологическими часами. Попытки проследить влияние различных эндогенных биоритмов на восприятие времени неоднократно предпринимались и ранее, но их роль в этом процессе по-прежнему остается во многом недостаточно исследованной.

Полученные данные показали, что особенности светового воздействия на субъективное восприятие временной длительности связаны с индивидуальным исходным состоянием человека и его личностными особенностями: уровнем нейротизма и соотношением симпатико-парасимпатического баланса. Эти показатели определили направленность вегетативных перестроек, ввиду чего было выделено две группы с различным характером реакции на синий свет. Отсутствие наблюдаемых эффектов при замене синего света белым дневным подтверждает особую силу влияния выделенной части спектра ( $\sim 460 - 485$  нм) видимого излучения. Синий свет, таким образом, стимулировал преобладание возбудимости симпатического отдела АНС у одиннадцати человек из восемнадцати. Те же испытуемые продемонстрировали тенденцию к укорочению длительности субъективной минуты после светового воздействия. У остальных семи сдвиг вегетативного баланса имел противоположную



направленность без перемен в отмеривании минутного временного интервала.

Статистически значимого влияния синего света на восприятие времени по выборке в целом не установлено. У части испытуемых (1-я группа) наблюдается тенденция к укорочению субъективной минуты (примерно на 10 с) после воздействия синим светом и сдвиг вегетативного баланса в сторону преобладания активности симпатического отдела АНС. В эту группу попали все испытуемые с высоким уровнем нейротизма. У меньшей части волонтеров (2-я группа) длительность субъективной минуты после воздействия синим светом не изменилась, тогда как вегетативный баланс сместился к преобладанию активности парасимпатического отдела АНС. При воздействии белым светом с такой же длительностью и интенсивностью данные эффекты не наблюдались.

#### Основные итоги и выводы

1. Впервые экспериментально показано, что воздействие синим светом на человеческий организм дает существенные по величине перестройки вегетативного баланса. Так, значения показателей общей мощности спектра ТР и индекса вегетативного равновесия VEI изменялись в среднем по модулю на 45%, по сравнению с фоновыми значениями.

2. Разная направленность сдвигов вегетативного баланса связана с различными типами вегетативного реагирования. У испытуемых с высоким уровнем нейротизма активность парасимпатического отдела АНС после воздействия синего света сменялась сдвигом в сторону преобладания симпатического отдела АНС. У испытуемых

с низким уровнем нейротизма наблюдалась противоположная картина.

3. Повышение тонуса коры мозга, усиление уровня бодрствования у части испытуемых согласуются с имеющимися в литературе данными о воздействии синей части спектра видимого излучения (~440 – 485 нм) через ганглиозные светочувствительные клетки сетчатки и супрахиазматические ядра гипоталамуса.

4. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность влияния характеристик освещения синим светом на параметры variability ритма сердца и подтверждают особое влияние выделенной части спектра (440 – 485 нм) видимого излучения (см. пункт 3).

5. Экспериментальные результаты проведенного исследования подтверждают необходимость введения ограничений на вечерне-ночное освещение с использованием источников света (в особенности люминофорных СД холодно-белого света, имеющих максимум сильной голубой полосы в диапазоне длин волн 446 – 477 нм) [24], с заметной долей излучения с длинами волн короче 540 нм. Такие ограничения обусловлены высокой степенью их биологической активности [30].

Наиболее целесообразным представляется использование светодиодного источника света, в котором свет с длиной волн около 460 нм, вызывающий «световое загрязнение» окружающей среды [31], заменен светом с длиной волны около 490 нм и одновременно добавлен свет с длиной волны примерно 635 нм. Последний источник выполняет важную функцию – восполняет дефицит излучения в красной области [32].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Provencio I., Rodriguez I.R., Jiand G., Hayes W.P., Moreira E.F., Rollag M.D.** A novel human opsin in the inner retina // *Journal of Neuroscience*. 2000. Vol. 20. No. 2. Pp. 600–605.

2. **Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., et al.** Measuring and using light in the melanopsin age // *Trends in Neurosciences*. 2014. Vol. 37. No. 1. Pp. 1–9.

3. **Brainard G.C., Sliney D., Hanifin J.P., et al.** Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420 nm) light // *Journal of Biological Rhythms*. 2008. Vol. 23. No. 5. Pp. 379–386.

4. **Hastings M.H., Maywood E.S., Brancaccio**

**M.** Generation of circadian rhythms in the suprachiasmatic nucleus // *Nature Reviews Neuroscience*. 2018. Vol. 19. No. 8. Pp. 453–469.

5. **Chellappa S.L., Steiner R., Blattner P., Oelhafen P., Götz T., Cajochen C.** Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? // *PloS One*. 2011. Vol. 6. No. 1. P. e16429.

6. **Vandewalle G., Maquet P., Dijk D.J.** Light as a modulator of cognitive brain function // *Trends in Cognitive Sciences*. 2009. Vol. 13. No. 10. Pp. 429–438.

7. **Hawes B.K., Brunyé T.T., Mahoney C.R., Sullivan J.M., Aal C.D.** Effects of four work-

- place lighting technologies on perception, cognition and affective state // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2012. Vol. 42. No. 1. Pp. 122–128.
8. **Lockley S.W., Evans E.E., Scheer F.A.J.L., et al.** Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans // *Sleep*. 2006. Vol. 29. No. 2. Pp. 161–168.
9. **Cajochen C.** Alerting effects of light // *Sleep Medicine Reviews*. 2007. Vol. 11. No. 6. Pp. 453–464.
10. **Ferlazzo F., Piccardi L., Burrattini C., et al.** Effects of new light sources on task switching and mental rotation performance // *Journal of Environmental Psychology*. 2014. Vol. 39. September. Pp. 92–100.
11. **Cho J.R., Joo E.Y., Koo D.L., Hong S.B.** Let there be no light: the effect of bedside light on sleep quality and background electroencephalographic rhythms // *Sleep Medicine*. 2013. Vol. 14. No. 12. Pp. 1422–1425.
12. **Алянчикова Ю.О., Смирнов А.Г.** Связь индивидуальной минуты и тревожности у больных неврозами // *Физиология человека*. 1997. Т. 23. № 5. С. 51–54.
13. **Чилигина Ю.А.** Влияние экзаменационного стресса на субъективную оценку времени у студентов-первокурсников // *Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта*. 2015. № 4 (122). С. 257–262.
14. **Симуткин Г.Г.** Искажение индивидуального времени как проявление десинхроноза при сезонных аффективных расстройствах // *Социальная и клиническая психиатрия*. 2000. Т. 10 № 3. С. 16–20.
15. **Merchant H., Harrington D.L., Meck W.H.** Neural basis of the perception and estimation of time // *Annual Review of Neuroscience*. 2013. Vol. 36. Pp. 313–336.
16. **Schwarz M.A., Winkler I., Sedlmeier P.** The heart beat does not make us tick: the impacts of heart rate and arousal on time perception // *Attention, Perception & Psychophysics*. 2013. Vol. 75. No. 1. Pp. 182–193.
17. **Grote V., Kelz Ch., Goswami N., et al.** Cardio-autonomic control and wellbeing due to oscillating color light exposure // *Physiology & Behavior*. 2013. Vol. 114. Pp. 55–64.
18. **Schäfer A., Kratky K.W.** The effect of colored illumination on heart rate variability // *Complementary Medicine Research*. 2006. Vol. 13. No. 3. Pp. 167–173.
19. **Meesters Y., Dekker V., Schlangen L.J., Bos E.H., Ruiter M.J.** Low-intensity blue-enriched white light (750 lux) and standard bright light (10 000 lux) are equally effective in treating SAD. A randomized controlled study // *BMC Psychiatry*. 2011. Vol. 11. No. 1. P. 17.
20. **Glickman G., Byrne B., Pineda C., Hauck W.W., Brainard G.C.** Light therapy for seasonal affective disorder with blue narrow-band light-emitting diodes (LEDs) // *Biological Psychiatry*. 2006. Vol. 59. No. 6. Pp. 502–507.
21. **Walsh C.M., Prendergast R.L., Sheridan J.T., Murphy B.A.** Blue light from light-emitting diodes directed at a single eye elicits a dose-dependent suppression of melatonin in horses // *The Veterinary Journal*. 2013. Vol. 196. No. 2. Pp. 231–235.
22. **Аладов А.В., Бирючинский С.Б., Валюхов В.П., Закгейм А.Л., Тальнишних Н.А., Черняков А.Е.** Динамически управляемая система освещения светодиодами с широким диапазоном цветовых температур (2800 – 10 000 К) и высоким качеством цветопередачи ( $R_A > 90$ ) // *Светотехника*. 2016. № 6. С. 19–25.
23. **Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е.** Полихромные спектрально-перестраиваемые осветительные приборы со светодиодами: опыт разработки и применения // *Светотехника*. 2013. № 5-6. С. 34–39.
24. **Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е.** О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800 – 10 000 К // *Светотехника*. 2012. № 3. С. 7–10.
25. **Михайлов В.М.** Вариабельность ритма сердца. Опыт практического применения. Иваново: Ивановская обл. типография, 2000. 200 с.
26. **Baevsky R.M., Chernikova A.G.** Heart rate variability analysis: physiological foundations and main methods // *Cardiometry*. 2017. No. 10. May. Pp. 66–76.
27. **Malik M.** Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: task force of the European society of cardiology and the North American society for pacing and electrophysiology // *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 1996. Vol. 1. No. 2. Pp. 151–181.
28. **Базыма Б.А.** Психология цвета: теория и практика. М.: Изд-во «Речь», 2005. 112 с.
29. **Чилигина Ю.А.** Динамика показателей функционального состояния организма после применения умственной нагрузки и холодогипоксического воздействия // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология*. 2003. № 1. С. 78–85.

30. Аладов А.В., Слезин В.Б., Корсакова Е.А., Шульц Е.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Воздействие белого света с варьируемой цветовой температурой на электроэнцефалограмму человека // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19. № 4. С. 30–33.

31. Анисимов В.Н., Виноградова И.А. Световой режим, мелатонин и риск развития рака

// Вопросы онкологии. 2006. Т. 53. № 5. С. 491–498.

32. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Черняков А.Е. Светодиод белого света с улучшенной фотобиологической безопасностью // Описание полезной модели к патенту ПМ №136239. Опубликовано 27.12.2013. Бюлл. № 36.

*Статья поступила в редакцию 03.06.2019, принята к публикации 08.07.2019.*

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АЛАДОВ Андрей Вальменович** – старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.  
aaladov@mail.ioffe.ru

**БЕРЛОВ Дмитрий Николаевич** – старший преподаватель кафедры анатомии и физиологии человека и животных Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Наб. реки Мойки, 48  
dberlov@yandex.ru

**ВАЛЮХОВ Владимир Петрович** – доктор технических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
Valyukhov@yandex.ru

**ВЛАСОВА Ольга Леонардовна** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы биомедицинских систем и технологии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
olvlasova@yandex.ru

**ЗАКГЕЙМ Александр Львович** – кандидат технических наук, заведующий сектором Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.  
zakgeim@mail.ioffe.ru

**ПАНИХИНА Анна Андреевна** – магистрант кафедры анатомии и физиологии человека и животных Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Наб. реки Мойки, 48  
scrimmyrim@gmail.com

**ФОТИАДИ Александр Эпаминондович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
fotiadi@rphf.spbstu.ru



## REFERENCES

1. **Provencio I., Rodriguez I.R., Jiand G., et al.**, A novel human opsin in the inner retina, *Journal of Neuroscience*. 20 (2) (2000) 600–605.
2. **Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., et al.**, Measuring and using light in the melanopsin age, *Trends in Neurosciences*. 37 (1) (2014) 1–9.
3. **Brainard G.C., Sliney D., Hanifin J.P., et al.**, Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420 nm) light, *Journal of Biological Rhythms*. 23 (5) (2008) 379–386.
4. **Hastings M.H., Maywood E.S., Brancaccio M.**, Generation of circadian rhythms in the suprachiasmatic nucleus, *Nature Reviews Neuroscience*. 19 (8) (2018) 453–469.
5. **Chellappa S.L., Steiner R., Blattner P., et al.**, Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? *PloS One*. 6 (1) (2011) e16429.
6. **Vandewalle G., Maquet P., Dijk D.J.**, Light as a modulator of cognitive brain function, *Trends in Cognitive Sciences*. 13 (10) (2009) 429–438.
7. **Hawes B.K., Bruny T.T., Mahoney C.R., et al.**, Effects of four workplace lighting technologies on perception, cognition and affective state, *International Journal of Industrial Ergonomics*. 42 (1) (2012) 122–128.
8. **Lockley S.W., Evans E.E., Scheer F.A.J.L., et al.**, Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans, *Sleep*. 29 (2) (2006) 161–168.
9. **Cajochen C.**, Alerting effects of light, *Sleep Medicine Reviews*. 11 (6) (2007) 453–464.
10. **Ferlazzo F., Piccardi L., Burrattini C., et al.**, Effects of new light sources on task switching and mental rotation performance, *Journal of Environmental Psychology*. 39 (September) (2014) 92–100.
11. **Cho J.R., Joo E.Y., Koo D.L., Hong S.B.**, Let there be no light: the effect of bedside light on sleep quality and background electroencephalographic rhythms, *Sleep Medicine*. 14 (12) (2013) 1422–1425.
12. **Alyanchikova Yu.O., Smirnov A.G.**, Svyaz individualnoy minuty i trevozhnosti u bolnykh nevrozami [Relationship between an individual minute and an anxiety among patients with neurosis], *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 23 (5) (1997) 51–54.
13. **Chiligina Yu.A.**, Exam stress effect on subjective evaluation of time among the first-course students, *Scientific Theory Journal “Uchenye Zapiski Universiteta Imeni P.F. Lesgafta”*. (4 (122)) (2015) 257–262.
14. **Simutkin G.G.**, Iskazheniye individualnogo vremeni kak proyavleniye desinkhronoza pri sezonnykh affektivnykh rasstroystvakh [Distortion of an individual time as a manifestation of desynchronization in seasonal affective disorders], *Social and Clinical Psychiatry*. 2000. 10(3) (2000) 16–20.
15. **Merchant H., Harrington D.L., Meck W.H.**, Neural basis of the perception and estimation of time, *Annual Review of Neuroscience*. 36 (2013) 313–336.
16. **Schwarz M.A., Winkler I., Sedlmeier P.**, The heart beat does not make us tick: the impacts of heart rate and arousal on time perception, *Attention, Perception & Psychophysics*. 75 (1) (2013) 182–193.
17. **Grote V., Kelz Ch., Goswami N., et al.**, Cardio-autonomic control and wellbeing due to oscillating color light exposure, *Physiology & Behavior*. 114 (2013) 55–64.
18. **Schäfer A., Kratky K.W.**, The effect of colored illumination on heart rate variability, *Complementary Medicine Research*. 13 (3) (2006) 167–173.
19. **Meesters Y., Dekker V., Schlangen L.J., et al.**, Low-intensity blue-enriched white light (750 lux) and standard bright light (10 000 lux) are equally effective in treating SAD. A randomized controlled study, *BMC Psychiatry*. 11(1) (2011) 17.
20. **Glickman G., Byrne B., Pineda C., et al.**, Light therapy for seasonal affective disorder with blue narrow-band light-emitting diodes (LEDs), *Biological Psychiatry*. 59 (6) (2006) 502–507.
21. **Walsh C.M., Prendergast R.L., Sheridan J.T., Murphy B.A.**, Blue light from light-emitting diodes directed at a single eye elicits a dose-dependent suppression of melatonin in horses, *The Veterinary Journal*. 2013. 196 (2) (2013) 231–235.
22. **Aladov A.V., Biryuchinskiy S.B., Valyukhov V.P., et al.**, Dinamicheski upravlyayemaya sistema osveshcheniyasvetodiodami shirokim diapazonom tsvetovykh temperatur (2800 – 10000 K) i vysokim kachestvom tsvetoperedachi ( $R_A > 90$ ) [A dynamically-controlled lighting system with (2800 – 10 000 K) LEDs providing a high-quality color transfer], *Light and Engineering*. (6) (2016) 19–25.
23. **Aladov A.V., Zakgeim A.L., Mizerov M.N., Chernyakov A.E.**, Polikhromnyye spektralno-perestraivayemye osvetitelnyye pribory so svetodiodami: opyt razrabotki i primeneniya [Polychromatic spectral-tunable lighting devices

with LEDs: design practice and case history], *Light and Engineering*. (5-6) (2013) 34–39.

24. **Aladov A.V., Zakgeim A.L., Mizerov M.N., Chernyakov A.E.**, O biologicheskom ekvivalente izlucheniya svetodiodnykh i traditsionnykh istochnikov sveta s tsvetovoy temperaturoy 1800 – 10 000 K [On the biological radiation equivalents of LEDs' and traditional lighting sources with color temperatures of 1800 – 10 000 K], *Light and Engineering*. (3) (2012) 7–10.

25. **Mikhaylov V.M.**, Variabelnost ritma serdtsa. Opyt prakticheskogo primeneniya [Heart rate variability. Case history], Ivanovo, 2000.

26. **Baevsky R.M., Chernikova A.G.**, Heart rate variability analysis: physiological foundations and main methods, *Cardiometry*. (10) (2017) 66–76.

27. **Malik M.**, Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: task force of the European society of cardiology and the North American society for pacing and electrophysiology, *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 1(2) (1996) 151–181.

28. **Bazyma B.A.**, Psikhologiya tsveta: Teoriya i praktika [Physiology for color: theory and practice], “Rech” Publishing, Moscow, 2005.

29. **Chiligina Yu.A.**, Dinamika pokazateley funktsionalnogo sostoyaniya organizma posle primeneniya umstvennoy nagruzki i kholodogipoksicheskogo vozdeystviya [Indexes dynamics of functional state of an organism after a mental workload and a cold-hypoxic attack], *Biological Communications*. (1) (2003) 78–85.

30. **Aladov A.V., Slezin V.B., Korsakova E.A., et al.**, The effects of white light with variable color temperature on human electroencephalogram, *Vestnik Novykh Meditsinskikh Tekhnologiy*. 19 (4) (2012) 30–33.

31. **Anisimov V.N., Vinogradova I.A.**, Svetovoy rezhim, melatonin i risk razvitiya raka [Lighting regime, melatonin and cancer development risk], *Voprosy Onkologiy [Oncology Topics]*. 53 (5) (2006) 491–498.

32. **Aladov A.V., Zakgeim A.L., Chernyakov A.E.**, Svetodiod belogo sveta s uluchshennoy fotobiologicheskoy bezopasnostyu [A white-color LED with improved photobiological safety], Opisaniye poleznoy modeli k patentu PM № 136239 [A description of a useful model to patent PM No. 136239]. Published 27.12.2013. Bul. No. 36.

*Received 03.06.2019, accepted 08.07.2019.*

## THE AUTHORS

### **ALADOV Andrey V.**

*Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS*  
26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
aaladov@mail.ioffe.ru

### **BERLOV Dmitriy N.**

*The Herzen State Pedagogical University of Russia*  
48 Moika Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation  
dberlov@yandex.ru

### **VALYUKHOV Vladimir P.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
Valyukhov@yandex.ru

### **VLASOVA Olga L.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
olvasova@yandex.ru

**ZAKGEIM Alexander L.**

*Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS*  
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
zakgeim@mail.ioffe.ru

**PANIHINA Anna A.**

*Herzen State Pedagogical University of Russia*  
48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation  
scrimmyrim@gmail.com

**FOTIADI Alexander E.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
fotiadi@rphf.spbstu.ru