

ВЛИЯНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ПСИХИЧЕСКУЮ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

УДК 613.693

Смолевский А.Е.

ГНЦ РФ «Институт медико-биологических проблем» РАН, Москва

INFLUENCE OF LED LIGHTING ON MENTAL PERFORMANCE

Smoleevskiy AE

GNC RF «Institut mediko-biologicheskikh problem» RAN,, Moscow, Russia

Введение

Профессиональная деятельность человека неразрывно связана с его способностью воспринимать зрительную информацию и напрямую зависит от параметров световой среды. Комфортная и безопасная светотехническая обстановка особенно важна для космонавтов деятельность которых сопряжена с постоянным стрессом, и длительной изоляцией от естественной среды обитания.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью создания на базе современных источников света надежных, комфортных и безопасных систем освещения для космических летательных аппаратов. Специфические условия эксплуатации предъявляют жесткие технические требования к космическим светильникам. В то же время они должны выполнять свое основное предназначение – обеспечивать полноценное восприятие зрительных сигналов, создавать благоприятные условия для поддержания работоспособного состояния космонавта, повышения качества и надежности его деятельности. Наиболее перспективными источниками света для применения в космонавтике могут стать светодиоды, обладающие рядом технических достоинств (высокая надежность, долговечность, экономичность, низкое энергопотребление, пожарная, ударная, вибрационная и экологическая безопасность и др.) [1]:

С появлением светодиодных источников света большое внимание специалистов вновь привлекла концепция динамического освещения (Мельников Л.Н., 1972), изменяемого по спектрально-цветовым и яркостным характеристикам, и направленного на регуляцию функционального состояния человека. Варьируя спектрально-энергетические характеристики источников света можно воспроизвести суточную динамику естественного освещения в условиях длительного космического полета или морского похода. Это один из перспективных методов профилактики и лечения десинхроноза – симптомокомплекса, включающего расстройство сна (сокращение длительности и ухудшение качества), сонливость в период бодрствования, снижение аппетита, ухудшение настроения и, как следствие, снижение работоспособности. На основании вышеизложенного, можно предпо-

ложить, что светодиодное освещение является наиболее перспективным в плане применения в гермообъектах.

Однако, при всех неоспоримых технических преимуществах светодиодов, неравномерность спектрального состава их света (преобладание синего компонента – «blue light hazard» и малая доля зеленого – феномен «зеленой долины») вызывают опасения у специалистов. [2–4]. В качестве основного механизма негативного действия светодиодного света обсуждается угнетение синтеза мелатонина, который рассматривается как основной регулятор психической активности.

В литературе представлены многочисленные исследования, показывающие как негативное [4, 5], так и позитивное влияние светодиодов [6–9] на здоровье и работоспособность человека. Разнообразие и противоречивость результатов может быть обусловлена тем, что действие света на организм человека носит не линейный и не аддитивный характер [10, 11].

В рамках настоящего исследования проведена экспериментальная оценка влияния на психическую работоспособность оператора систем светодиодного освещения с постоянными и варьируемыми во времени (воспроизводящими естественную суточную динамику) спектрально-энергетическими характеристиками, предназначенных для эксплуатации на международной космической станции.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнялось на базе Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ-ИМБП РАН) в период 2014–2015 гг. Уровень научной обоснованности, достаточность мероприятий по организации медицинского контроля и обеспечению безопасности Программы экспериментальных исследований с участием человека была признана соответствующей нормам биомедицинской этики и одобрена Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ-ИМБП РАН (Протокол № 367 от 31.07.2014 г.). Риск и дискомфорт при проведении исследования определен как минимальный.

Работа проводилась в 2 этапа с перерывом в 5 месяцев. В исследованиях первого этапа приняли участие 10 здоровых добровольцев-мужчин в возрасте от 25 до 42

лет. Участие во втором этапе экспериментальных исследований приняли 8 добровольцев из числа участников первого этапа.

На каждом этапе регистрировались фоновые значения, оценивались влияние экспериментального освещения и эффекты последствия.

В качестве контрольного использовалось искусственное освещение люминесцентными лампами с коррелированной цветовой температурой (КЦТ) $4500 \pm 450\text{K}$ («нейтрально-белый» свет). Лампы располагались в камере ограниченного объема таким образом, чтобы создаваемые ими уровни освещенности соответствовали требованиям ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования.» и были сопоставимы по значению с уровнями освещенности, создаваемыми экспериментальными светодиодными светильниками.

На первом этапе эксперимента оценивалось влияние постоянного (по спектрально-энергетическим характеристикам) освещения бортовых светодиодных светильников ССД301, ССД305 и ССД307. КЦТ системы освещения составляла $4000 \pm 100\text{K}$.

На втором этапе экспериментального исследования использовалась динамическая система освещения на базе светодиодных светильников ССД311 с варьируемыми во времени спектрально-энергетическими характеристиками. Данные светильники позволяют воспроизводить динамику освещения близкую к естественному суточному циклу. Алгоритм динамического освещения представлен в табл. 1.

Переключение между режимами освещения осуществлялось плавно в течение 20–30 минут. Общая продолжительность светлого времени суток (включая гражданские сумерки) составила 18 часов, что близко соответствует дню 15 мая для Московской области.

В соответствии с принятыми на РС МКС нормативами продолжительности дневного периода в цикле «сна – бодрствования» космонавтов («Требования к планированию режима труда и отдыха космонавтов во время полетов на МКС», 2000 г.) циклограмма экспериментальных исследований была разработана таким образом, чтобы продолжительность периода бодрствования составила 15,5 ч и приходилась на светлое время суток. Гражданские сумерки начинались за полтора часа до подъема и завершались через 1 час после отбоя.

Оценка психической работоспособности операторов проводилась с помощью корректурной пробы и Адаптивной Модели Операторской Деятельности (АМОД).

Корректурная проба применялась для оценки свойств внимания оператора. Использовался буквенный компьютеризированный вариант методики. Перед обследованием стояла задача находить в тестовом материале две разные буквы и выделять их кликом мыши: один вид букв – правым кликом, другой вид – левым. Через каждые 60 секунд соотношение букв и кликов мыши менялось на противоположное. Продолжительность рабочей сессии составляла 10 минут. Подсчитывалось общее число просмотренных знаков, число правильно выделенных букв, число пропущенных или ошибочно выделенных букв.

Тестирование качества операторской деятельности испытуемых выполнялось по методике АМОД, разработанной на кафедре «Эргономики и информационно-измерительных систем» «МАТИ» – РГТУ им. К.Э. Циолковского и предназначенной для диагностики уровня психической работоспособности.

Процедура методики АМОД заключается в одновременном выполнении двух заданий. Первое задание состоит в том, чтобы следить за перемещением объекта в виде квадрата на экране компьютера и постоянно удерживать в его центре крест, который управляется курсором компьютерной «мыши». Второе задание предполагает работу с числами: над квадратом высвечиваются на короткое время три цифры, нужно сложить две крайние цифры и полученную сумму сравнить с центральной в предьявленном ряду. Если сумма окажется больше центральной цифры, следует дать ответ путем нажатия на правую клавишу «мыши», если же сумма окажется меньше, то нужно нажать левую клавишу «мыши». В случае успешной деятельности слежения за объектом повышается скорость и амплитуда перемещения квадрата по экрану компьютера. Если же исполнитель не справляется с предьявленной сложностью задачи слежения, то движение объекта замедляется и упрощается. Адаптивность задач счета (сравнения чисел) заключается в том, что задачи выдаются не на фиксированное время, а в режиме автотемпа, т.е. подстраиваются под скорость работы конкретного исполнителя. В процессе тестирования регистрировались: частота и амплитуда колебаний виртуальной цели по осям координат, количество правильных, не правильных и пропущенных ответов, средняя длительность ответов. На основе данных параметров рассчитывались показатели качества деятельности:

$Q_{cx} = A_x * \omega_x$ – качество слежения по горизонтальной оси;

$Q_{cy} = A_y * \omega_y$ – качество слежения по вертикальной оси;

Таблица 1. Алгоритм имитации светлого времени суток.

Моделируемое время суток	Длительность светового воздействия, мин	Коррелированная цветовая температура (КЦТ), Кельвины
рассветные сумерки	60 минут	$2200 \pm 200\text{K}$
утро при ясной погоде	120 минут	$4000 \pm 400\text{K}$
ясная погода	300 минут	$5000 \pm 500\text{K}$
облачный покров	120 минут	$8000 \pm 800\text{K}$
ясная погода	180 минут	$5000 \pm 500\text{K}$
вечер при ясной погоде	120 минут	$4000 \pm 400\text{K}$
вечерние сумерки	60 минут	$2200 \pm 200\text{K}$

$Q_c = \sqrt{Q_{cx}^2 + Q_{cy}^2}$ – комплексный показатель качества слежения;

$Q_n = \frac{(N_+)^2}{(N_+ + N_-) * T_{\text{уср}}}$ – комплексный показатель качества счета;

$Q = Q_c * Q_n$ – показатель качества совмещенной деятельности,

где ω_x – частота колебаний виртуальной цели на экране монитора по оси x;

ω_y – частота колебаний виртуальной цели по оси y;

A_x – амплитуда колебаний виртуальной цели по оси x;

A_y – амплитуда колебаний виртуальной цели по оси y;

N_+ – количество правильных ответов;

N_- – количество неправильных ответов;

$T_{\text{уср}}$ – период усреднения результатов тестирования.

По результатам выполнения корректурной пробы и методики АМОД оценивались также точность и производительность деятельности. Коэффициент точности вычислялся по формуле Уиппла:

$$K = \frac{V - r}{V + p}$$

где K – коэффициент точности, V – общее количество обнаруженных стимулов, r – количество неправильно обнаруженных стимулов, p – количество пропущенных стимулов. Данный показатель принимает значения от 0 до 1,0 и отражает устойчивость внимания, то есть способность выполнять определенную работу с требуемой точностью в течение заданного интервала времени. Производительности работы оценивалась по показателю «Продуктивность», который вычислялся с учетом точности выполнения задания по модифицированной формуле Е.Д. Хомской и В.А. Терехова [12]. Модифицированная формула содержит вместо «Точности» «Коэффициент точности», что позволяет учитывать при расчетах не только пропуски, но и ошибки:

$$P = K * N$$

где P – продуктивность, K – коэффициент точности, N – количество всех просмотренных знаков. Продуктив-

ность характеризует концентрацию и устойчивость внимания.

Обобщение полученных результатов и их оценка, были произведены с помощью методов непараметрической статистики. Вычислялись показатели: медиана, квартили, межквартильный размах. Для проверки статистической значимости различий между множественными (более двух) повторными измерениями был применен L критерий тенденций Пейджа. Для выявления статистически значимых различий между парами измерений в связанных выборках был применен парный критерий Т. Вилкоксона. Различия считались значимыми при вероятности ошибки первого рода $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

В условиях как постоянного, так и динамического светодиодного освещения точность выполнения тестовой деятельности, сохранялась на высоком уровне (0,90–0,95). Статистически значимых различий между значениями коэффициента точности до, после и на протяжении всех экспериментальных исследований не выявлено. Продуктивность выполнения корректурной пробы при постоянном светодиодном освещении возросла от фона к последствию на 6,5% при динамическом и на 12% при постоянном режимах светодиодного освещения ($p \leq 0,01$, L критерий тенденций Пейджа).

Параметры, характеризующие качество выполнения разных типов тестовой деятельности представлены в таблице 2.

Показатели качества выполнения задач слежения, счета и совмещенной деятельности в условиях постоянного и динамического светодиодного освещения значимо не изменились по сравнению с фоновыми значениями. При освещении с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками качество слежения было в целом выше (на 8–15%; $p < 0,05$, парный критерий Т Вилкоксона), чем при освещении, моделирующем естественную суточную динамику (рис. 1), а показатель качества счета незначимо ниже (на 5%; $p \leq 0,05$, парный критерий Т Вилкоксона).

При этом, результирующий показатель качества совмещенной деятельности в условиях постоянного светодиодного освещения оказался выше (на 8%; $p \leq 0,05$,

Таблица 2. Результаты выполнения тестовой операторской деятельности (методика АМОД, n=8).

Показатель качества деятельности	Этап исследования	Статистический показатель			
		Медиана	1-й квартиль	3-й квартиль	Межквартильный размах
Комплексный показатель качества слежения	Фон	0,948	0,637	1,145	0,508
	Постоянное освещение	1,062	0,607	1,574	0,967
	Последствие	1,075	0,544	1,520	0,977
	Фон 2	0,878	0,583	1,385	0,802
	Динамическое освещение	0,918	0,478	1,395	0,918
	Последствие 2	0,685	0,587	1,370	0,783
Комплексный показатель качества счета	Фон	0,676	0,603	1,094	0,492
	Постоянное освещение	0,762	0,596	1,200	0,604
	Последствие	0,758	0,658	1,233	0,575
	Фон 2	0,813	0,640	1,278	0,637
	Динамическое освещение	0,764	0,646	1,252	0,606
	Последствие 2	0,819	0,736	1,128	0,392

Показатель совмещенной деятельности	Фон	0,695	0,522	0,849	0,327
	Постоянное освещение	0,846	0,578	1,032	0,453
	Последствие	0,771	0,604	1,044	0,441
	Фон 2	0,791	0,671	1,029	0,358
	Динамическое освещение	0,779	0,512	0,915	0,402
	Последствие 2	0,686	0,498	0,900	0,402

парный критерий Т Вилкоксона), чем при динамическом светодиодном освещении (рис. 2). Отчасти это может быть обусловлено тем, что при моделировании суточной динамики изменяется не только КЦТ, но и уровни освещенности.

Выводы

1. Установлено, что рассмотренные типы светодиодного освещения (при непрерывном воздействии до 12 суток) не оказали значимого негативного влияния на психическую работоспособность.
2. Светодиодное освещение обеспечило стабильно высокую точность выполнения тестовой деятельности (0,90–0,95) на протяжении всего периода исследования.

Продуктивность деятельности возросла на 6,5% при динамическом и на 12% при постоянном режиме светодиодного освещения ($p \leq 0,01$, L критерий тенденций Пейджа).

3. При освещении с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками качество слежения было на 8–15% выше, а показатель качества совмещенной деятельности на 8% выше, чем при освещении, моделирующем естественную суточную динамику ($p \leq 0,05$, парный критерий Т Вилкоксона). Можно предположить, что позитивный эффект динамического освещения реализуется на более продолжительном временном интервале.

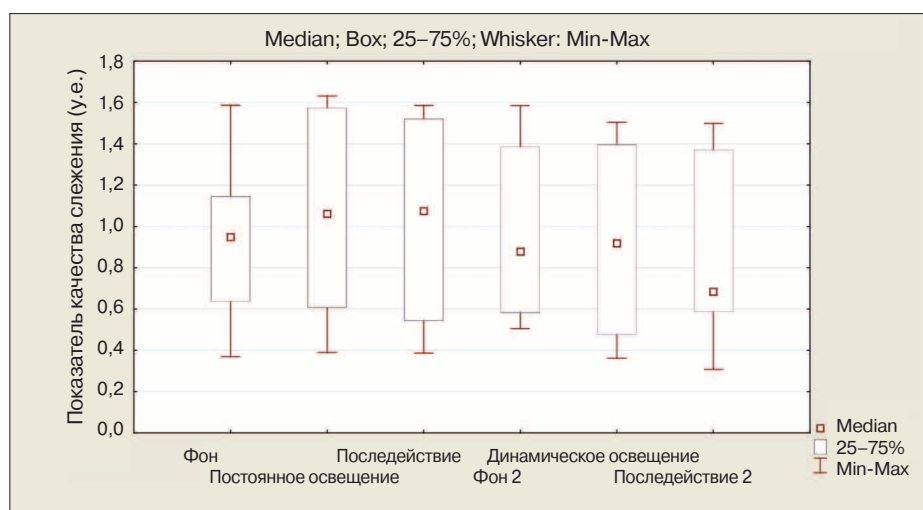


Рисунок 1. Качество слежения в условиях постоянного и динамического светодиодного освещения.

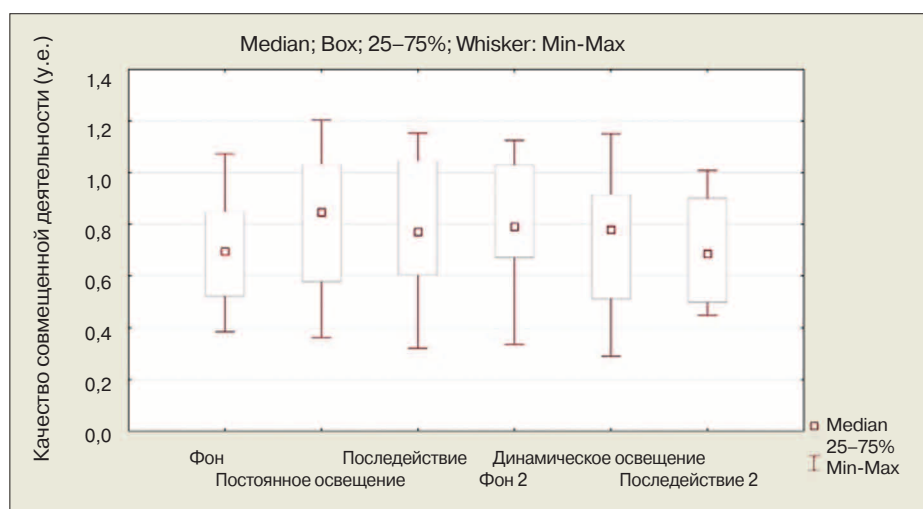


Рисунок 2. Качество совмещенной деятельности в условиях постоянного и динамического светодиодного освещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Закгейм А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор). Светотехника; 2012; № 6: 12–21.
2. Зак П.П., Островский М.А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков. Светотехника; 2012; № 3: 4–6.
3. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety «Lighting systems using light-emitting diodes: health issues to be considered». 2010: 13.
4. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Синий свет светодиодов – новая гигиеническая проблема. Анализ риска здоровью; 2016; № 1 (13): 15–25.
5. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Риски влияния света светодиодных панелей на состояние здоровья оператора. Анализ риска здоровью; 2014; № 4: 37–46.
6. Мурашева М., Никифоров С., Шищенко А. Исследование фотобиологической опасности светодиодных осветительных приборов для нужд железнодорожного транспорта. Полупроводниковая светотехника; 2011; № 1: 34–40.
7. Долин Е.В., Звездина И.В., Надеждин Д.С., Текшева Л.М., Шмаров И.А. Сравнительная гигиеническая оценка условий освещения люминесцентными лампами и светодиодными источниками света. Светотехника; 2011; № 1: 48–52.
8. Текшева Л.М., Надеждин Д.С. Состояние нервно-психической сферы младших школьников в течение учебного дня при люминесцентном и светодиодном освещении учебного кабинета. Гигиена и санитария; 2014; № 4: 123–127.
9. Кучма В.Р., Сухарева Л.М., Текшева Л.М., Степанова М.И., Сазанюк З.И. Гигиенические аспекты применения светодиодных источников света для общего освещения в школах. Гигиена и санитария; 2013; № 5: 27–31.
10. Архангельский Д.В., Снетков В.Ю. Исследование влияния света на зрительную работоспособность и утомление человека с учетом его циркадных ритмов. Вестник МЭИ; 2012; № 6: 219–224.
11. Зуева М.В., Рапопорт С.И., Цапенко И.В., Бубеев Ю.А., Манько О.М., Смолеевский А.Е. Нарушения физиологических ритмов при нейродегенеративных заболеваниях: проблемы и перспективы световой терапии. Клиническая медицина; 2016; № 6 (94): 427–432.
12. Сидоров К.Р. Количественная оценка продуктивности внимания в методике «Корректирующая проба» Б. Бурдона. Вестник Удмуртского университета; 2012; № 4: 50–57.

REFERENCES:

1. Zakgejm A.L. [LED lighting: energy efficiency, visual perception, health safety (Review)]. Light engineering; 2012; № 6: 12–21. [Article in Russian].
2. Zak P.P. Ostrovskij M.A. [The potential danger of LED lighting for the eyes of children and adolescents]. Light engineering; 2012; № 3: 4–6. [Article in Russian].
3. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety «Lighting systems using light-emitting diodes: health issues to be considered». 2010: 13. [Document in English].
4. Kapcov V.A., Dejnego V.N. [Blue light of LEDs – the new hygienic problem]. Analysis of health risks; 2016; № 1 (13): 15–25. [Article in Russian].
5. Kapcov V.A., Dejnego V.N. [Risks of influence of light of LED panels on the state health of the operator]. Analysis of health risks; 2014; № 4: 37–46. [Article in Russian].
6. Murasheva M., Nikiforov S., Shishenko A. [Study of photobiological danger of LED lighting products for the needs of rail transport]. Semiconductor lighting engineering; 2011; № 1: 34–40. [Article in Russian].
7. Dolin E.V., Zvezdina I.V., Nadezhdin D.S., Teksheva L.M., Shmarov I.A. [Comparative hygienic evaluation of lighting conditions fluorescent lamps and LED light sources]. Light engineering; 2011; № 1: 48–52. [Article in Russian].
8. Teksheva L.M., Nadezhdin D.S. [Status of neuro-psychic sphere of the junior schoolchildren during the school day under fluorescent and LED lighting of training room]. Hygiene and sanitation; 2014; № 4: 123–127. [Article in Russian].
9. Kuchma V.R., Suhareva L.M., Teksheva L.M., Stepanova M.I., Sazanjuk Z.I. [Hygienic aspects of LED light sources for general lighting in schools]. Hygiene and sanitation; 2013; № 5: 27–31. [Article in Russian].
10. Arhangel'skij D.V., Snetkov V.Ju. [Investigation of the effect of light on the visual performance and fatigue man considering his circadian rhythms]. Vestnik of MEI; 2012; № 6: 219–224. [Article in Russian].
11. Zueva M.V., Rapoport S.I., Tsapenko I.V., Bubeev Yu.A., Manko O.M., Smoleevskiy A.E. [Alterations of physiological rhythms in neurodegenerative disorders: problems and prospects of light therapy]. Clinical medicine; 2016; № 6 (94): 427–432. [Article in Russian].
12. Sidorov K.R. [Quantitative evaluation of the productivity of attention to the method of B. Bourdon "proofreading-test"]. Bulletin of Udmurt University; 2012; № 4: 50–57. [Article in Russian].

РЕЗЮМЕ

Представлены результаты оценки психофизиологических эффектов двух систем светодиодного освещения, разработанных для космических летательных аппаратов. Оценивалось влияние освещения с постоянными и варьируемыми во времени спектрально-энергетическими характеристиками (моделирующими естественную суточную динамику) на работоспособность человека, длительно находящегося в замкнутом объеме. Исследование проводилось в гермокамере на выборке из 8-ми здоровых добровольцев-мужчин (26–43 года). Было проведено 4 эксперимента продолжительностью 11–12 суток. Психическая работоспособность оценивалась с помощью методик «Корректирующая проба» и «Адаптивная модель операторской деятельности» (АМОД). Установлено, что рассмотренные типы светодиодного освещения (при непрерывном воздействии до 12 суток) обеспечивают стабильно высокую точность выполнения тестовых заданий (0,90–0,95). Продуктивность тестовой деятельности значительно возросла по сравнению с фоновыми значениями (на 6,5% при динамическом и на 12% при постоянном режимах светодиодного освещения).

Ключевые слова: психическая работоспособность, оператор, космический полет, фотобиологическая безопасность, опасность синего света, изоляция, динамическое освещение, светодиодное освещение.

ABSTRACT

The article presents the results of the assessment of psycho-physiological effects of two LED lighting systems designed for spacecraft. Influence of lighting with constant and varying spectral and energy characteristics (simulating dynamics of natural earth day) on mental performance was evaluated during long-term isolation in the closed volume. The study was conducted in the closed volume on a sample of 8 healthy male volunteers (26–43 years). It was conducted 4 experiments duration 11–12 days. Mental performance was evaluated by means of «proofreading test» methods and «adaptive model of the operator's activity». It was found that the tested types of LED lighting (duration of up to 12 days) provides high accuracy of performance the test tasks (0,90–0,95). Productivity of the test activity was significantly increased compared with baseline values (up 6.5% under dynamic and up 12% at constant LED lighting conditions).

Keywords: mental performance, operator, space flight, photobiological safety, blue light hazard, isolation, dynamic lighting, LED lighting.

Контакты:

Смолеевский А.Е. E-mail: smoll13@mail.ru