

Генрих Сарычев, д. т. н., академик АЭН РФ | svetosar@mail.ru |
Галина Гаврилкина, к. т. н. | gavriikinagn@mail.ru | Игорь Пудиков | pudys@yandex.ru

К расчету светотехнических установок, учитывающих циркадианные эффекты освещения

На основе результатов, изложенных в патенте US 7,678,140 B2 2010 и в предположении справедливости действия закона взаимозаместимости в фотореакции подавления секреции мелатонина, определена эффективность воздействия облучения в стандартных осветительных установках на циркадианную систему человека. Результаты сравнены с ранее опубликованными данными, высказаны соображения о развитии этих исследований.

Последние десятилетия в светотехнике были отмечены двумя особо значимыми событиями: уникальным, не имеющим прецедента прогрессом светодиодной техники и возрождением повышенного интереса к биологическим процессам, протекающим в организме человека под действием света.

Последнее характеризуется появлением ряда стандартов, акцентирующих внимание на возможных опасностях использования видимого некогерентного излучения, рекомендаций по проектированию осветительных установок (ОУ) и облучательных светотехнических установок (ОСУ) с учетом фотобиологических процессов, а также расширением практики фототерапии при различного рода отклонениях, в том числе гормональных [1–20].

Одной из значимых фотобиологических реакций, привлекающей пристальное внимание, является реакция подавления секреции мелатонина, основного гормона, регулирующего циркадианные ритмы человека. Наиболее полно рассматриваемая реакция описана в патенте [12].

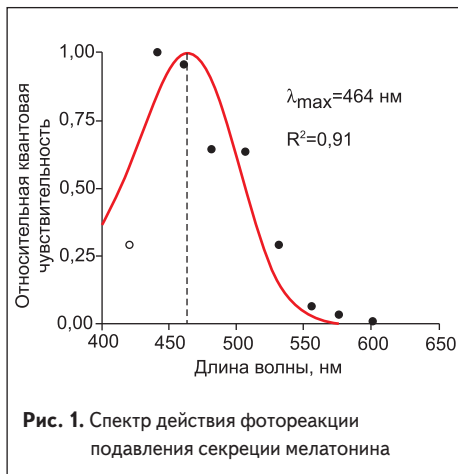


Рис. 1. Спектр действия фотореакции подавления секреции мелатонина

Этот патент, наряду с весьма представительным литературным обзором, содержит описание и результаты эксперимента по определению спектра действия реакции подавления секреции мелатонина $B_{цир}(\lambda)$ (рис. 1).

Следует заметить, что авторы патента [12], тщательно изучив длинноволновую область видимого диапазона спектра вплоть до $\lambda = 600$ нм, оставили практически без внимания видимую область $\lambda < 460$ нм и всю длинноволновую часть УФ-спектра. Между тем известно, что в практике лечения САР (сезонного аффективного расстройства) указанная область излучения используется в сочетании с излучением в видимом диапазоне спектра [7, 11]. Последнее может явиться дополнительным доводом в пользу целесообразности использования профилактического УФ-излучения [4, 8, 14, 19].

Вопрос аддитивности воздействия излучения при полихроматическом свете также остался открытым.

Наибольшие трудности в использовании результатов [12] связаны с тем, что все эксперименты проведены при одном и том же времени облучения t , равном 90 мин (в промежутке между 2 и 3:30 ч ночи), т. е. авторы не выявили область правомочности закона взаимозаместимости¹.

Между тем уже сегодня можно рассматривать несколько видов ОУ (ОСУ), в которых учет (или создание) эффективной циркадианной составляющей облучения является обязательным:

- ОСУ для снятия сезонных депрессий;
- ОСУ для коррекции психо-эмоционального состояния при авиаперелетах;
- ОСУ в составе осветительных установок при вахтовых (круглосуточных) работах, на командных пунктах, диспетчерских и т. п.

Эти сферы применения не вызывают никаких сомнений, даже учитывая некоторые дополнительные затраты (в т.ч. электроэнергии). Компенсация этих затрат состоит в сохранении здоровья, повышении производительности труда, снижении брака в работе, снижении несчастных случаев [5, 6, 19]. Заметим, что в этих установках необходимо контролировать уровень «синей опасности» [1].

В настоящее время не очевидна необходимость применения такого рода «дооблучения» в жилых помещениях, хотя в ближайшие годы в этой сфере применения света возможно значительное высвобождение электроэнергии, часть которой может работать во благо здоровья и работоспособности человека.

Во всех остальных случаях, когда человек использует искусственное освещение на рабочем месте (в офисе, цехе, магазине и т. п.), применение указанного дополнительного облучения можно считать целесообразным при разумном сочетании его с естественным освещением и традиционным искусственным светом. Решение вышеозначенных задач предполагает вариацию времени облучения (от десятков минут до нескольких часов) с целью оптимизации экспозиции.

Учитывая это требование, конечную задачу предлагаем решать, сформулировав следующие положения:

- Принимаем диапазон облученности роговицы глаза для реакции подавления секреции мелатонина в пределах $0,015\text{--}0,35$ Вт/м², несколько сузив диапазон, использованный в эксперименте в [12].
- Время облучения предлагаем варьировать в пределах 0,5–8 ч. Нижняя граница выбирается для фототерапии сезонных депрессий, верхняя продиктована достаточно распространенным временем работы в одну смену.
- Из экспериментальных данных патента [12] имеем зависимость процентного снижения секреции мелатонина от дозы облучения $\Delta M = f(\epsilon_\lambda \times t)$, где ϵ_λ — спектральная облученность от $\lambda = 460$ нм, находящейся

¹ В [13] аналогичный результат был получен при $t = \text{const} = 2$ час., и он не разрешает сомнений.

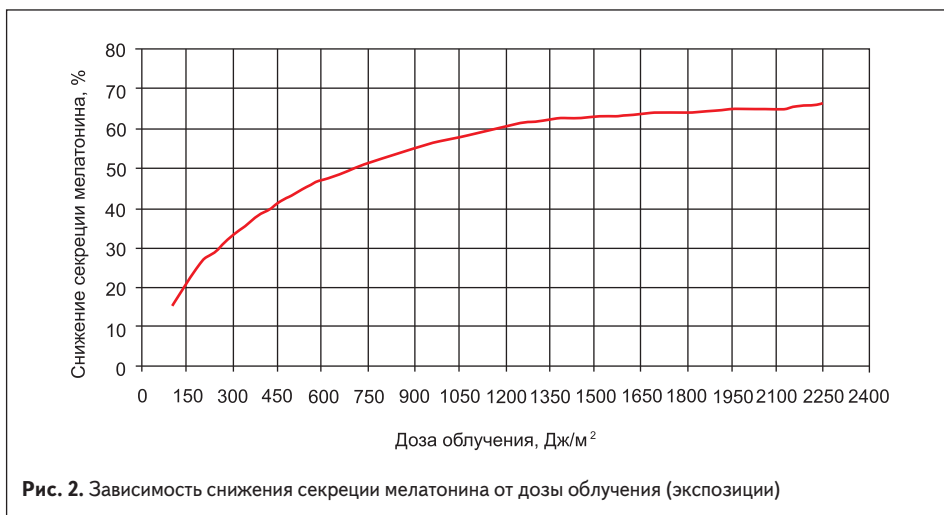


Рис. 2. Зависимость снижения секреции мелатонина от дозы облучения (экспозиции)

циркадианной составляющей. Эффективная циркадианная облученность роговицы глаза от ОУ с различными ИС, отвечающая за подавление мелатонина в плазме крови, $\epsilon_{\text{цир}}$ [Вт/м²] определяется как:

$$\epsilon_{\text{цир}} = a \times \int f(\lambda) B_{\text{цир}}(\lambda) \times d\lambda, \quad (1)$$

где: $f(\lambda)$ — спектральное распределение источника излучения в относительных единицах, нм^{-1} ; $B_{\text{цир}}(\lambda)$ — относительный спектр действия подавления секреции мелатонина (рис. 1); a — нормирующий множитель, $\text{Вт}/\text{м}^2$, определенный нами для каждого ИС при освещенности 100 лк.

Эти оценки свидетельствуют о том, что практически для всех источников света, даже при минимальной освещенности, фотореакция подавления секреции мелатонина превышает пороговый уровень, указанный в ряде публикаций [2, 12, 16]. Исключение составляет натриевая лампа высокого давления, где пороговый уровень достигается при повышенной освещенности (500 и 1000 лк).

в области максимальной чувствительности фотореакции, время облучения $t = 90$ мин. (рис. 2).

Указанные данные (рис. 1 и 2) достаточны для расчета светотехнических облучательных

установок с учетом циркадианных фотоэффектов.

В таблице 1 приведены оценки основных характеристик ОУ с различными источниками света (ИС) с учетом эффективной

Таблица 1. Значимые характеристики ОУ, учитывающие фотобиологический циркадианный фотоэффект (КСС осветительного прибора принята по Ламберту)

Тип ОУ	Цветовая температура, К	Горизонтальная освещенность E_h , лк	Вертикальная освещенность на роговице глаза, * E_v , лк	Эффективная циркадианная облученность, $\epsilon_{\text{цир}}$, Вт/м²	Результаты (экспозиция — % снижения мелатонина) [12]	
					Экспозиция 8 ч $\epsilon_{\text{цир}} t$, Дж/м²	«Отклик» — снижение мелатонина, ΔM , % (точность $\pm 20\%$)
ОУ с СД ХБ	6900	300	100	0,13	3744	50
		500	150	0,19	5472	57
		1000	300	0,38	10944	63
ОУ с СД НБ	5200	300	100	0,08	2304	46
		500	150	0,12	3456	50
		1000	300	0,24	6913	60
ОУ с СД ТБ	3250	300	100	0,07	2016	38
		500	150	0,11	3168	43
		1000	300	0,21	6048	60
ОУ с СД ТБ	2890	300	100	0,04	1152	27
		500	150	0,06	1728	36
		1000	300	0,12	3456	50
ОУ с ЛЛ	6200	300	100	0,10	2880	40
		500	150	0,15	4320	50
		1000	300	0,30	8640	62
ОУ с ЛЛ	4100	300	100	0,09	2592	40
		500	150	0,14	4032	50
		1000	300	0,27	7776	62
ОУ с КЛЛ	2700	300	100	0,05	1440	30
		500	150	0,07	2016	36
		1000	300	0,15	4320	50
ОУ с МГЛ	6000	300	100	0,11	3168	45
		500	150	0,17	4896	55
		1000	300	0,33	9504	63
ОУ с МГЛ	4200-4500	300	100	0,07	2016	38
		500	150	0,11	3168	45
		1000	300	0,21	6048	57
ОУ с На-лампой в.д.	2050	300	100	0,02	576	8
		500	150	0,03	864	15
		1000	300	0,06	1728	20

Таблица 2. Сопоставление расчетных данных и результатов экспериментов по [15, 16]

Тип ОУ	Цветовая температура, К	Освещенность роговицы глаза E_v , лк	Эффективная циркадианная облученность, $E_{цир}$, Вт/м ²	Эксперимент [15, 16]		Расчет по данным [12]
				Экспозиция, $E_{цир} t$, Дж/м ² ($t = 1$ ч)	ΔM , %	ΔM , % (точность $\pm 20\%$)
ОУ с ХБ СД	6900	94	0,122	439	25	40
		95	0,124	445	30	40
		318	0,403	1451	50	60
ОУ с НБ СД	5200	95	0,076	274	19	30
		154	0,123	443	25	40
		508	0,406	1462	50	62
ОУ с ЛЛ	6220	104	0,104	374	25	40
		349	0,348	1253	50	60
ОУ с ЛЛ	4100	214	0,199	716	25	43
		515	0,463	1667	50	62
ОУ с КЛЛ	2700	207	0,096	345	25	40
		722	0,360	1296	50	60
ОУ с На-лампой в. д.	2050	95	0,019	68	6	8
		357	0,070	252	25	30
		1246	0,250	900	50	50
ОУ с МГЛ	4000	95	0,066	238	14	24

Контрольная оценка предлагаемого метода расчета циркадианной составляющей излучения проведена по данным [15, 16] и представлена в таблице 2. Авторы [15, 16] опубликовали сведения по величинам освещенности роговицы глаза при различных ИС и соответствующим величинам снижения секреции мелатонина ΔM [%]. Расчет эффективной циркадианной облученности и экспозиции, а также расчет ΔM по данным [12] сделан авторами настоящей публикации.

Из таблицы 2 можно видеть, что циркадианный отклик, полученный в [15] и [16] для всех ИС, оказался ниже расчетных данных по предлагаемому нами методу. При этом следует отметить следующее:

- указанные расхождения сводятся к минимуму при высоких экспозициях и в ОУ с низкими цветовыми температурами ($T_{цв} < 3000$ К);
- ни в одном из приводимых примеров подавление секреции мелатонина не достигает своего максимума ($>70\%$);
- эксперимент [12] был основан на классическом принципе использования узкополосных практически монохроматических линий, которые приводят к фотореакции. Практически значимые расчеты ОУ и контрольные оценки по результатам экспериментов по [15] и [16] были сделаны в полихроматическом свете.

Не исключаем, что высказанные ранее соображения [20] о неаддитивности рассматриваемой реакции справедливы. Тем не менее нам уже сейчас представляется возможным практически использовать выражения $B_{цир}(\lambda)$ и $\Delta M = f(\epsilon_{цир}, t)$, приведенные в этой статье, вплоть до новых уточнений.

В любом случае авторы считают необходимым продолжить эти исследования, уточнив не только методику расчета ОУ (ОСУ), но и предложив конкретные решения для практической физиотерапии. Особое внимание следует обратить при

этом на выбор оптимальных доз эффективного облучения, как в проектировании ОУ (ОСУ), так и в задачах физиотерапии.

Авторы выражают благодарность к. т. н. Мудраку Е. И. за оказанную помощь в работе и к. т. н. Розовскому Е. И. за ценные замечания.

Литература

- Стандарт МЭК 62 471: 2006 «Фотобиологическая безопасность ламп и ламповых систем».
- IES TM-18-08 Light and Human Health: An Overview of the Impact of Optical Radiation on Visual, Circadian, Neuroendocrine and Neurobehavioral Responses.
- Брейнард Дж. К., Бернекер К. А. Влияние света на физиологию и поведение человека // Светотехника. 1996. №№ 1, 2.
- Holick M. F. Historical and new perspectives on the biologic effects of sunlight and vitamin D on health. Proceedings Lux Europa, Berlin, 2005.
- Бойс П. Свет и здоровье // Светотехника. 2006. № 2.
- Вейч Д. Свет, освещение и здоровье — вопросы для рассмотрения // Светотехника. 2005. № 6.
- Пудиков И. В. Использование фототерапии при сезонных депрессиях. Самара: ООО «БМВ и К». 2012.
- Гаврилкина Г. Н., Сарычев Г. С. Ультрафиолетовое излучение в фотобиологии: методы и средства облучательной техники. // Доклад на Российской светотехнической интернет-конференции «Свет без границ». 2009.
- Леонидов А. В. О явлении синхронизации организма световыми воздействиями // Светотехника. 2006. № 4.
- Марк Ри, Марианна Фигуэро, Джей Баллоу. Циркадная фотобиология: новые горизонты практической и теоретической

светотехники // Полупроводниковая светотехника. 2012. № 4.

- Пудиков И. В., Дорохов В. Б. Об особом физиологическом значении ультрафиолетовой части спектра для успешной фототерапии // Фотофизиология человека. 2012. № 6.
- United States Patent US 7,678,140 B2 Mar. 16, 2010. Brainard et al. Photoreceptor system for melatonin regulation and phototherapy, заявлено май 2001.
- Thapan K., Arendt J. and Skene D. J. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans // Journal of Physiology (2001), 535 (Pt.1).
- Методические указания «Профилактическое ультрафиолетовое облучение людей (с применением искусственных источников ультрафиолетового излучения) МУ 5046-89 от 27.07.1989.
- Rea M. C. К определению циркадианного света // J. Light & Vis. Env. Vol. 35, No. 3, 2011.
- Марк Ри, Эрон Смит, Эндрю Бирман, Марианна Фигейро. Анализ влияния наружного освещения на систему суточного ритма человека // Современная светотехника. 2010. № 3.
- Текшева Л. М. и др. Сравнительная гигиеническая оценка условий освещения люминесцентными лампами и светодиодными источниками света // Светотехника. 2011. № 1.
- В. В. Бомель, Г. Ван ден Бельд, В. Ван Оойжен. Промышленное освещение и производительность труда // Светотехника. 2003. № 1.
- Сарычев Г. С. Облучательные светотехнические установки. М., Энергоатом-издат. 1992.
- Шанда Я. Свет как актиничное (фотохимически активное) излучение // Светотехника. 2006. № 3.