

Антон Шаракшанэ | anton@colorindex.ru

Влияние освещения на циркадный ритм человека, «опасность синего света»

При одинаковой габаритной яркости источника и прочих равных условиях белый светодиодный свет оказывает на здоровье человека не большее воздействие, чем дневной или белый свет люминесцентных ламп той же цветовой температуры.

Влияние света на циркадный ритм

Яркий свет, а особенно его коротковолновая компонента, воздействуя на особый тип рецепторов сетчатки, вызывает снижение уровня мелатонина в крови — основного гормона, регулирующего циркадный ритм, уменьшая сонливость, увеличивая работоспособность и снижая остроту сезонной депрессии [1, 2]. Но всегда ли подобное воздействие является полезным?

Чтобы хорошо себя чувствовать днем, нужно крепко спать ночью. Для этого необходимо вовремя утром проснуться, провести день не сонным и захотеть спать вечером. Эту простую причинно-следственную связь знают врачи-сомнологи. Они утверждают, что основная мера, помогающая большинству людей, страдающих нарушениями сна, — просыпаться в одно время в любой день, даже в выходные, помогать организму проснуться утром и не мешать развитию хрупкого желания спать вечером.

Яркий солнечный свет с большой долей синей компоненты утром и в первую половину дня помогает проснуться и быть активным, а значит, способствует крепкому сну следующей ночью. Но в вечернее время яркий свет, наоборот, противопоказан. Так, миллионам людей мешает заснуть экран монитора. Они чувствуют себя разбитыми на следующий день, и очередным вечером снова садятся за компьютер в надежде дождаться если не желания спать, то хотя бы усталости, чтобы лечь в кровать и ждать сна. Экспериментально подтверждено, что оранжевые очки, не пропускающие коротковолновую компоненту в течение светового дня, задерживают наступление сна вечером и сокращают среднюю его продолжительность [3].

Относительная степень воздействия на циркадный ритм человека монохроматических излучений равных интенсивностей характеризуется кривой $c(\lambda)$ (таблица 3). По графику $c(\lambda)$ видно, что циркадное действие оказывает

только коротковолновая компонента (рис. 1). Относительная степень воздействия света произвольного спектра $X(\lambda)$ характеризуется параметром a_{CV} :

$$a_{CV} = \frac{\int X(\lambda)c(\lambda)d\lambda}{\int X(\lambda)V(\lambda)d\lambda},$$

где $V(\lambda)$ — кривая спектральной световой эффективности.

Влияние света на уровень мелатонина в крови однозначно и доказано. Пользу, вред или неоднозначность этого влияния нужно обсуждать. Но отдельный важный вопрос в тех случаях, когда речь заходит о светодиодном освещении, — не имеет ли светодиодный свет особенно выраженного циркадного действия по сравнению с традиционными источниками света благодаря спектру с выраженной коротковолновой компонентой?

Проанализированы спектры осветительных светодиодов (LED), люминесцентных ламп (ЛЛ), лампы накаливания (ЛН) и различных фаз дневного света. Построена зависимость параметра a_{CV} от цветовой температуры (рис. 2).

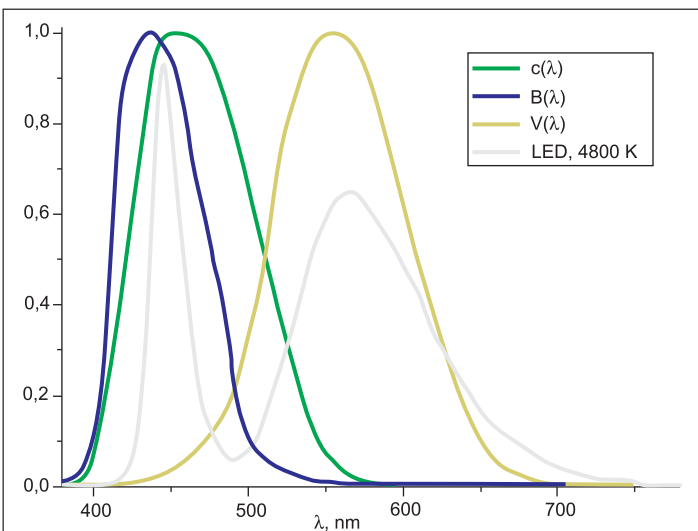


Рис. 1. Кривые функции спектральной циркадной эффективности $c(\lambda)$, функции опасности синего света $B(\lambda)$, функции спектральной световой эффективности $V(\lambda)$ и спектр белого светодиода с CCT 4800K, приведенные в условных единицах

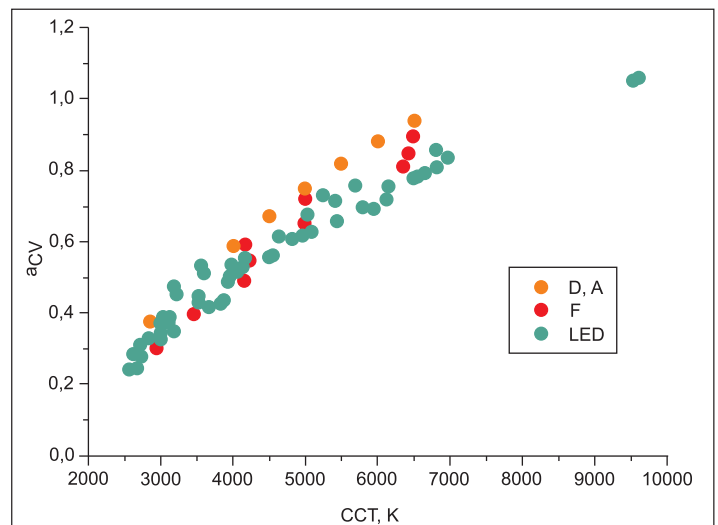
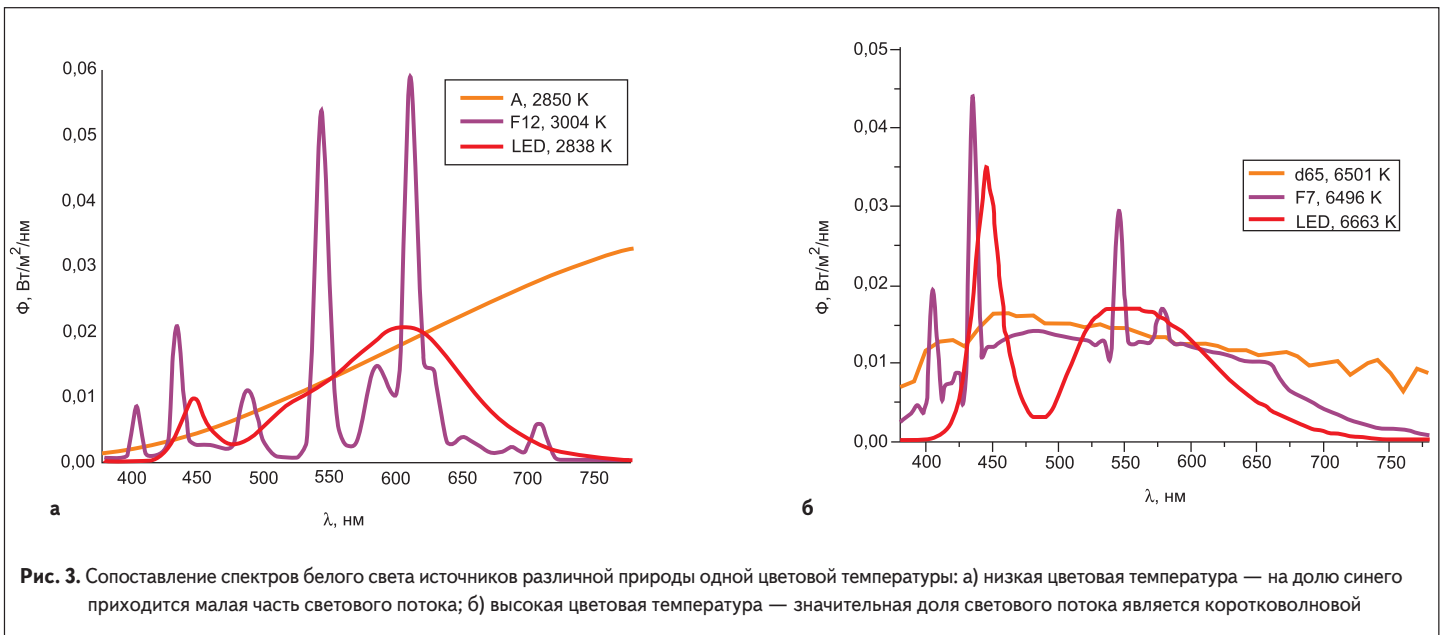


Рис. 2. Зависимость от цветовой температуры величины коэффициента a_{CV} , характеризующего степень влияния света на циркадный ритм, для трех групп источников: дневного света, ЛН, ЛЛ и белого светодиодного света



Параметр a_{CV} линейно зависит от коррелированной цветовой температуры, и для светодиодных спектров он в среднем не выше, чем для ЛЛ или дневного света той же цветовой температуры (рис. 3). Аналогичные результаты приведены в исследовании [8], в котором сравнивались LED, ЛЛ, МГЛ, НЛНД, НЛВД, ДРЛ, смешанный свет и свет луны. То есть воздействие светом с цветовой температурой 3000 К оказывает вдвое меньшее влияние на циркадный ритм, чем свет той же яркости за то же время, но с цветовой температурой 6000 К.

Простое средство почувствовать на себе эту зависимость для тех, кому приходится или просто нравится сидеть вечерами за компьютером, — программа f.lux, изменяющая цветовой баланс монитора и снижающая CCT излучения экрана к вечеру (рис. 4). По личному опыту автора эффект выражается в значимом увеличении средней продолжительности сна.

Опасность синего света

Оптическая система глаза строит изображения светящихся объектов на сетчатке. Яркость изображения, то есть интенсивность освещения чувствительных тканей сетчатки, пропорциональна габаритной яркости объекта. При чрезмерной яркости построенного на сетчатке изображения происходит обратимое и необратимое фотоповреждение ее тканей. Причем, если рассматривать цветные составляющие изображения, оказывается, что при умеренных яркостях фотоповреждающее действие на сетчатку оказывает только коротковолновая составляющая. Поэтому свет с выраженной долей коротковолновой составляющей оказывает значительно большее воздействие, чем свет, в спектре которого коротковолновая составляющая не выражена. В этом заключается так называемая «опасность синего света».

$V(\lambda)$ — функция относительной опасности цветных составляющих света при равных

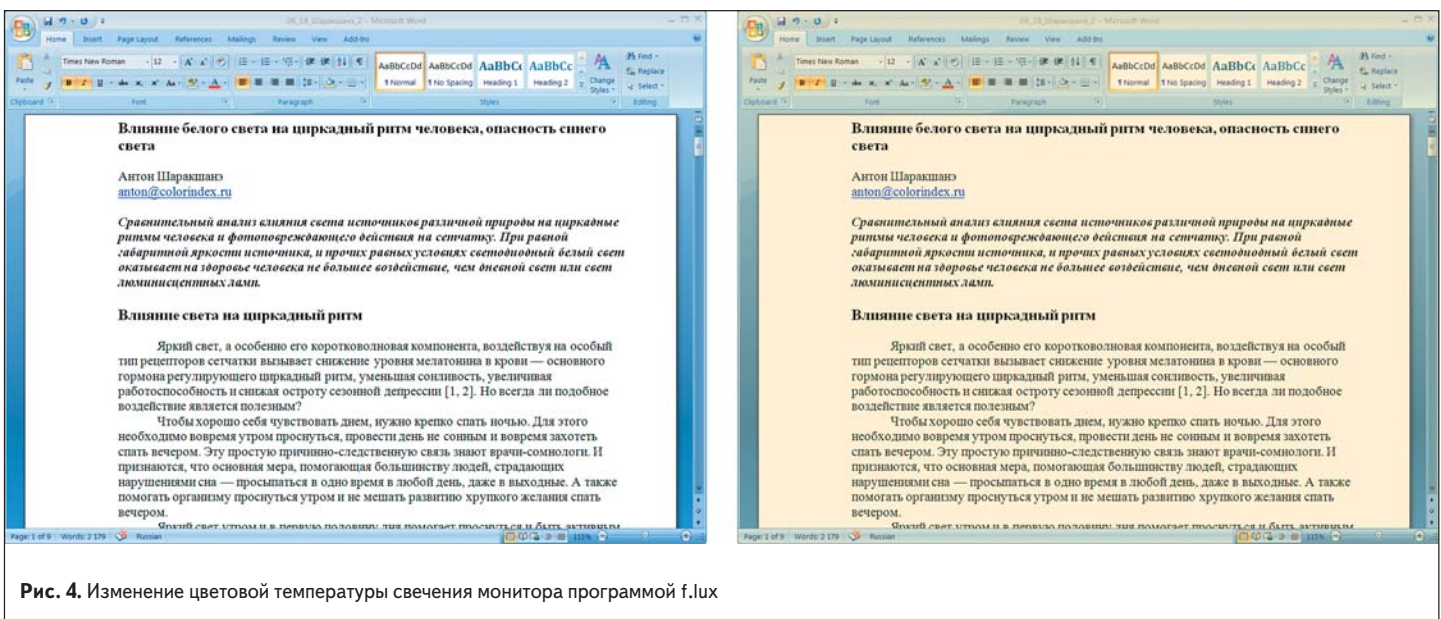
яркостях [6] (таблица 3). По аналогии с a_{CV} относительную степень воздействия света произвольного спектра $X(\lambda)$ при равной яркости освещения можно характеризовать параметром a_{BV} :

$$a_{BV} = \frac{\int X(\lambda)B(\lambda)d\lambda}{\int X(\lambda)V(\lambda)d\lambda},$$

где $V(\lambda)$ — кривая спектральной световой эффективности.

Сравнив параметр a_{BV} спектров двух источников равной яркости, можно определить, какой из них представляет большую опасность «синего света». Значения a_{BV} рассчитаны для того же набора спектров, что и a_{CV} , построена зависимость a_{BV} от CCT (рис. 5).

Зависимость a_{BV} от CCT, так же как и a_{CV} , хорошо аппроксимируется линейной зависимостью: сравнительная «опасность синего света» прямо пропорциональна цветовой



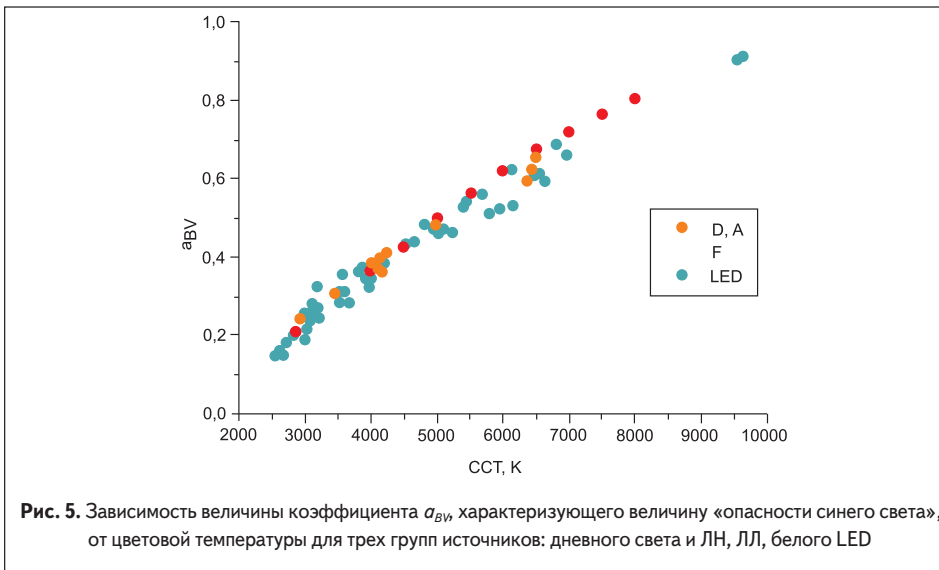


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента a_{BV} , характеризующего величину «опасности синего света», от цветовой температуры для трех групп источников: дневного света и ЛН, ЛЛ, белого LED

Таблица 1. Участвовавшие в исследовании белые LED

Светодиод	ССТ, К	a_{CV}	a_{BV}
Cree			
XLamp CXA2011 cool white	5026	0,68	0,46
XLamp CXA2011 neutral white	3990	0,53	0,35
XLamp CXA2011 warm white	3023	0,37	0,22
Xlamp ML-B Cool White	5079	0,63	0,47
Xlamp ML-B Neutral White	4150	0,53	0,38
Xlamp ML-B Warm White	2718	0,28	0,18
Xlamp ML-E Cool White	4961	0,62	0,47
Xlamp ML-E Neutral White	4180	0,54	0,38
Xlamp ML-E Warm White	2561	0,24	0,15
Xlamp MX-3 Cool White	5677	0,76	0,56
Xlamp MX-3 Neutral White	4136	0,53	0,38
Xlamp MX-3 Warm White	2651	0,25	0,15
Xlamp MX-3S Cool White	6553	0,78	0,61
Xlamp MX-3S Neutral White	4167	0,55	0,40
Xlamp MX-3S Warm White	3087	0,39	0,27
Xlamp MX-6 Cool White	6499	0,78	0,61
Xlamp MX-6 Neutral White	4162	0,54	0,39
Xlamp MX-6 Warm White	3113	0,39	0,27
XLamp XB-D cool white	6118	0,72	0,62
XLamp XB-D warm white	3006	0,37	0,23
Xlamp XM-L	5941	0,69	0,52
XLamp XT-E cool white	6965	0,84	0,66
XLamp XT-E warm white	2838	0,33	0,20
XLampMPL-EZW	3024	0,35	0,23
XP-G Cool White	6149	0,76	0,53
XP-G Warm White	3035	0,39	0,24
XP-E Neutral White	3945	0,50	0,35
XP-E-HEW Cool White	6633	0,79	0,59
XP-E-HEW Neutral White	4641	0,61	0,44
XP-E-HEW Outdoor White	3104	0,37	0,28
XP-E-HEW Warm White 85-90CRI	3014	0,36	0,19
XP-E-HEW-Warm & 80 CRI White	3075	0,37	0,24
Nichia			
Warm White (color rank e)	3656	0,42	0,28
Warm White (color rank sw35)	3594	0,51	0,31
Warm White (color rank sw35)	3525	0,43	0,29
White (color rank c)	5430	0,66	0,54
White (High CRI, color rank sw50)	5232	0,73	0,56
White (Moderate CRI, color rank sw50)	5400	0,72	0,43
«Оптоган»			
OLP-X3528F4A, 3000K	2994	0,34	0,25
OLP-X3528F4A, 4000K	3928	0,49	0,37
OLP-X3528F4A, 5000K		0,61	0,48
OLP-X3528F4A, 6500K	6803	0,86	0,69
OSRAM			
Oslo Square LCW CQAR EC	3035	0,36	0,22
Oslo Square LCW CQAR PC	4524	0,56	0,43
Oslo Square LUW CQAR (streetwhite)	9626	1,06	0,91
Oslo SSL LCW CQDP CC warm white	3214	0,45	0,25
Oslo SSL LCW CQDP EC warm white	3026	0,36	0,22
Oslo SSL LCW CQDP PC neutral white	4505	0,56	0,43
Oslo SSL LCW CRDP EC warm white	3178	0,47	0,33
Oslo SSL LCW CRDP PC warm-neutral white	3557	0,53	0,36
Oslo SSL LUW CQDP cool white	9536	1,05	0,90
Oslo SSL LUW CRDP (streetwhite)	6803	0,81	0,69
Philips Lumileds			
LXM3-PW51	3973	0,53	0,33
LXM3-PW61	3520	0,45	0,31
LXM3-PW71	3027	0,36	0,23
LXM3-PW81	2717	0,31	0,18
LXM7-PW40	4040	0,51	0,38
LXM8-PW27	2619	0,28	0,16
LXM8-PW30	2986	0,33	0,21
LXML-PW31, PW21, PW11	5791	0,70	0,51
LXML-PW51	3861	0,44	0,37
LXML-PW71	3191	0,35	0,27

температуре источника при равной экспозиции и габаритной яркости источников. Оговорка про равную яркость чрезвычайно важна, так как на практике потребители часто сталкиваются со светодиодами, не закрытыми рассеивателем, или со светодиодами за слабым рассеивателем, не защищающим от слепящего действия. Источники с рассеивателями имеют максимальную силу света по оси 350–500 кд на 1000 лм. Это значит, что для соответствия габаритной яркости значению в 5000 кд/м² (таково наиболее мягкое требование для светильников общего освещения по ГОСТ Р 54350-2011 [6]) необходимо, чтобы с 1 см² рассеивателя излучалось не более одного люмена [7].

Это довольно жесткое требование не всегда выполняется на практике. Габаритная яркость открытого светодиода, излучающего ~100 лм с площади ~1 мм² на четыре порядка выше предельно допустимых значений. При удалении от источника сила света и габаритная яркость в теории остаются неизменными, но на практике яркость изображения, которое оптическая система глаза строит на сетчатке, уменьшается из-за ограниченной разрешающей способности оптической системы глаза. Так, например, безопасен свет звезд, многие из которых имеют габаритную яркость, превышающую габаритную яркость Солнца. На достаточном удалении не спит и открытый светодиод. Но требуемое для этого расстояние заведомо превышает типичные дистанции в практике общего освещения общественных помещений. Поэтому не закрытый рассеивателем мощный осветительный светодиод любой цветовой температуры представляет серьезную опасность для зрения. А закрытый, при условии соблюдения норм по габаритной яркости и равномерности яркости по выходному отверстию светильника, оказывает на здоровье человека не большее воздействие, чем традиционные источники.

Детали проведенного анализа

Для анализа использовались 62 спектра белых LED (табл. 1), 12 спектров ЛЛ (CIE standard illuminant F), девять спектров дневного света (CIE standard illuminant D) и спектр ЛН (CIE standard illuminant A) табл. 2. Использованные для сравнения A, D, F — стандартные источники МКО. Спектры светодиодов оцифрованы с графиков, приведенных в официальной документации, с максимальной тщательностью, но некоторой неизбежной погрешностью. При выборе светодиодных спектров не применялись иные критерии, кроме известности производителя и популярности серии на российском рынке.

Все математические операции для всех спектров проводились в общем диапазоне 380–780 нм. Для наглядности все спектры нормированы на одинаковую освещенность 1000 лк. Но при расчетах a_{CV} и a_{BV} постоянные множители не имели значения, так как методика учитывает лишь распределение энергии излучения по спектру.

Зависимости $a_{CV}(LED)$, $a_{BV}(LED)$, $a_{CV}(A, D)$, $a_{BV}(A, D)$, $a_{CV}(F)$ и $a_{BV}(F)$ линейны с коэффициентами корреляции 0,98; 0,98; 0,99; 1,00; 0,98

и 0,99 соответственно. Все коэффициенты корреляции значимы при $p < 0,01$.

Линейная аппроксимация:

$$a_{CV}(LED) = 0,00013 \times T - 0,04;$$

$$a_{CV}(A,D) = 0,00014 \times T + 0,05;$$

$$a_{CV}(F) = 0,00015 \times T - 0,11;$$

$$a_{BV}(LED) = 0,00011 \times T - 0,10;$$

$$a_{BV}(A,D) = 0,00012 \times T - 0,10;$$

$$a_{BV}(F) = 0,00011 \times T - 0,07.$$

Таблица 2. Используемые в анализе спектры дневного света (D), ЛЛ (A) и ЛЛ (F)

Источник	ССТ, К	a_{CV}	a_{BV}
D40	4005	0,59	0,36
D45	4502	0,67	0,43
D50	5000	0,75	0,50
D55	5499	0,82	0,56
D60	6000	0,88	0,62
D65	6501	0,94	0,67
D70	7000	0,99	0,72
D75	7497	1,04	0,77
D80	7989	1,08	0,81
A	2857	0,38	0,21
F1	6430	0,85	0,63
F2	4230	0,55	0,41
F3	3455	0,40	0,31
F4	2942	0,30	0,24
F5	6348	0,81	0,60
F6	4149	0,49	0,37
F7	6496	0,90	0,66
F8	4998	0,72	0,48
F9	4157	0,59	0,40
F10	4988	0,65	0,49
F11	4007	0,52	0,38
F12	3004	0,34	0,24

Таблица 3. Значения функции спектральной циркадной эффективности $s(\lambda)$ и функции опасности синего света $B(\lambda)$

λ , нм	$s(\lambda)$	$B(\lambda)$
380	0,002	0,010
385	0,004	0,013
390	0,011	0,025
395	0,024	0,050
400	0,063	0,100
405	0,128	0,200
410	0,231	0,400
415	0,355	0,800
420	0,486	0,900
425	0,615	0,950
430	0,737	0,980
435	0,850	1,000
440	0,949	1,000
445	0,987	0,970
450	1,000	0,940
455	0,997	0,900
460	0,994	0,800
465	0,987	0,700
470	0,972	0,620
475	0,946	0,550
480	0,907	0,450
485	0,854	0,400
490	0,793	0,220
495	0,727	0,160
500	0,658	0,100
505	0,588	0,079
510	0,517	0,063
515	0,447	0,050
520	0,378	0,040
525	0,312	0,032
530	0,249	0,025
535	0,192	0,020
540	0,142	0,016
545	0,101	0,013
550	0,073	0,010
555	0,055	0,008
560	0,040	0,006
565	0,027	0,005
570	0,017	0,004
575	0,011	0,003
580	0,007	0,003
585	0,000	0,002
590	0,000	0,002
595-700	0,000	0,001
705-780	0,000	0,000

Примечание: Значения $s(\lambda)$ приведены по [5], значения $B(\lambda)$ по [4].

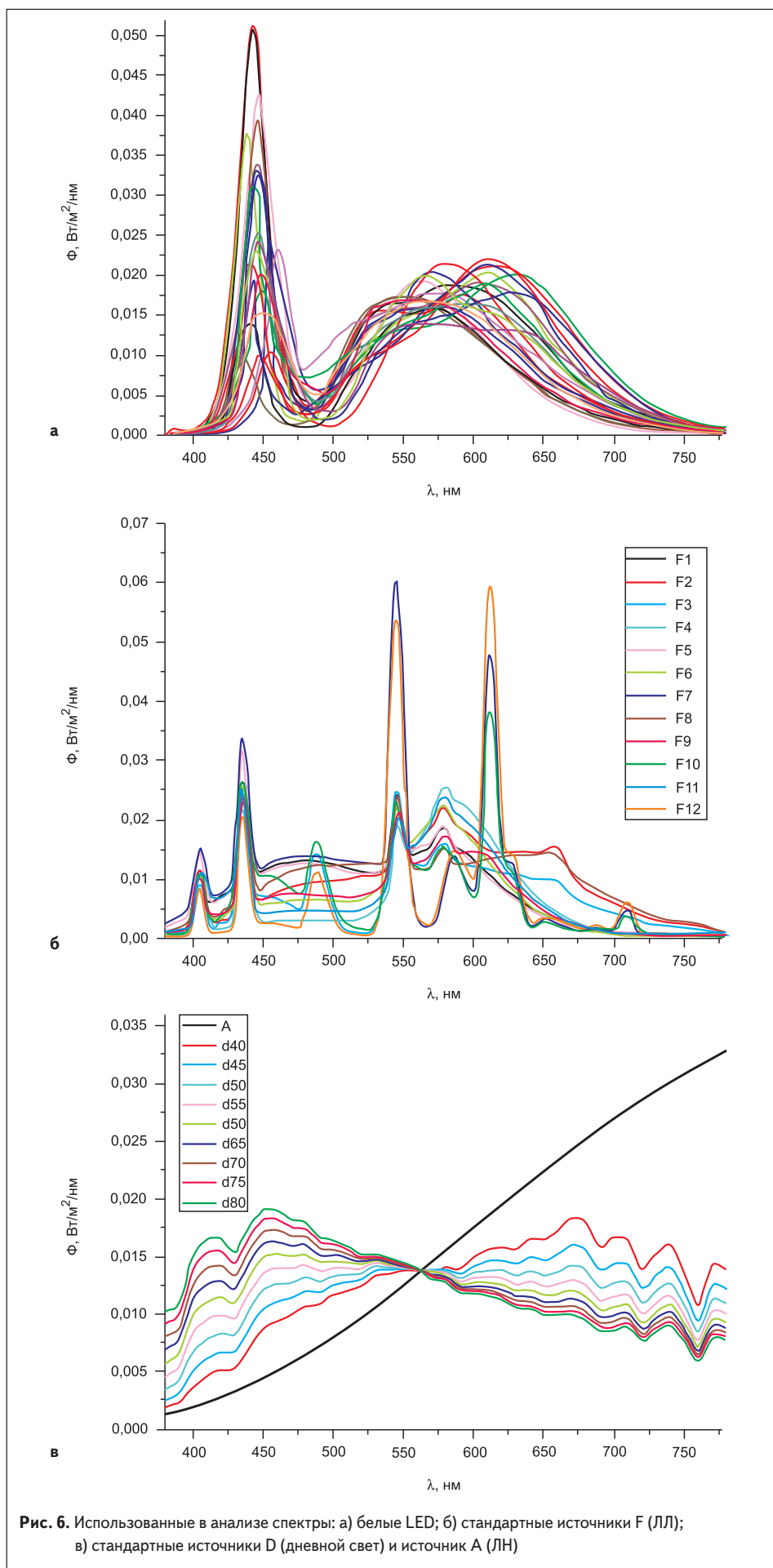


Рис. 6. Используемые в анализе спектры: а) белые LED; б) стандартные источники F (ЛЛ); в) стандартные источники D (дневной свет) и источник A (ЛН)

Необходимо отметить, что постоянные составляющие, по сравнению со значениями a_{CV} и a_{BV} , в границах диапазона 3000–8000 К малы, и ими можно пренебречь, считая значения a_{CV} и a_{BV} прямо пропорциональными цветовой температуре и несущественно различающимися для семейств спектров различных видов.

У биологов, офтальмологов и здравомыслящих людей характерная форма спектра светодиодного света с выраженным пиком в коротковолновой области вызывает предположение об особенном и возможно вредном воздействии такого света на самочувствие и здоровье человека [9]. Однако важна не сама высота синего пика, а площадь под ним и отношение этой площади к площади под всем спектром. Математический анализ показывает, что общая энергетическая доля синей компоненты в спектре белого светодиодного света не выше, чем в спектре других традиционных источников той же цветовой температуры, в том числе в спектре дневного света. Такое ограничение является следствием требования белизны, то есть требования попадания координат цвета света на кри-

вую АЧТ с определенным балансом синего и желтого.

Вопрос об «опасности синего света» сводится к вопросу соблюдения норм габаритной яркости и равномерности этой яркости. Например, обычная настольная лампа, стоящая на столе рядом с детской кроваткой, с не защищенной от глаз ребенка нитью накаливания, опаснее мощного светодиодного светильника любого типа с равномерно светящимся рассеивателем большой площади.

А воздействие на циркадную систему относительно слабого, по сравнению с дневным освещением, светодиодного (равно как и люминесцентного) освещения в светлое время суток может разве что частично компенсировать недостаток солнечного света в помещении. В вечернее же время воздействие яркого света высоких цветовых температур, наоборот, может оказать негативное воздействие. И это одинаково справедливо для источников любой природы. ●

Литература

1. Марк С. Ри, Марианна Дж. Фигуэро, Джей Ди Баллоу. Циркадные ритмы: новые горизонты практической и теоретической светотехники // Полупроводниковая светотехника. 2012. № 6.
2. Марк С. Ри, Аарон Смит, Эндрю Бьерман, Марианна Дж. Фигуэро. Анализ влияния наружного освещения на систему суточного ритма человека // Современная светотехника. 2010. № 3.
3. Figueiro MG, Mark S. Rea. Lack of short-wavelength light during the school day delays dim light melatonin onset (DLMO) in middle school students Mariana G. 2010.
4. IEC 62471:2006 Photobiological safety of lamps and lamp systems (ГОСТ Р МЭК 62471 «Светобиологическая безопасность ламп и ламповых систем».
5. Gall D. Die Messung circadianer Strahlungsgr en. Tagung Licht und Gesundheit 26. Berlin. 2004.
6. ГОСТ Р 54350-2011 «Приборы осветительные: светотехнические требования и методы испытаний».
7. А. Шаракшанэ. Минимальная площадь рассеивателя, при которой светильник не слепит // Современная светотехника. 2012. № 3.
8. Бижак Г., Кобав М. Б. Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина // Светотехника. 2012. № 3.
9. Зак П. П., Островский М. А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков // Светотехника. 2012. № 3.