

Ocena bezpieczeństwa fotobiologicznego miejskiego oświetlenia energooszczędnego

Łukasz Pierzchała^{1*}, Marcin Fisior²

¹ Zakład Ochrony Wód, Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

² Zakład Akustyki Technicznej i Techniki Laserowej, Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

* Autor do korespondencji: lpierzchala@gig.eu

STRESZCZENIE

Przekroczenia bezpiecznego progu ekspozycji na promieniowanie o wysokiej energii (niebieskiego i UV) może powodować powstawanie szeregu zjawisk chorobowych. Szczególnie wrażliwym na nadmierne dawki tego typu promieniowania jest aparat wzroku. W ramach niniejszej pracy na podstawie badań laboratoryjnych oceniono ryzyko fotobiologiczne generowane przez zastosowanie oświetlenia energooszczędne do oświetlania przestrzeni miejskich. Uzyskane wyniki wskazują, że systemy oprawy oświetleniowej typu LED, mogą być źródłem promieniowania, które znacząco negatywnie oddziałuje na wzrok, a także wpływać na zaburzenie cyklu dobowego.

Słowa kluczowe: oświetlenie miejskie, promieniowanie UV, zagrożenie fotobiologiczne

Assessment of photobiological safety of energy-efficiency urban lighting

ABSTRACT

Exceeding the safe threshold for exposure on high energy radiation (UV and blue light) could cause the emergence of a number of diseases. Eyesight is particularly sensitive to excessive lighting. This paper presents the laboratory research on the assessment of the photobiological risk generated by the energy-efficiency urban lighting. The results show that LED lighting systems can be a source of radiation that significantly negatively affects the eyesight and could contribute to circadian rhythm disorders.

Keywords: urban lighting, UV radiation, photobiological risk

WSTĘP

Szacuje się że sztuczne źródła światła, zużywają około 265 milion MWh/rok, co stanowi prawie 19% produkcji energii elektrycznej na całym świecie. Na polskich drogach umieszczonych jest około 3,3 mln opraw, które w ciągu roku zużywają ponad 1,5 tys. GWh energii elektrycznej, a oświetlenie może stanowić nawet około 40% całkowitych kosztów energetycznych przeciętnego miasta. Wdrażanie na szeroką skalę oświetlenia energooszczędnego jest wynikiem zmieniającego się prawa, kierunków polityki na szczeblu krajowym i europejskim w obszarze ekologii oraz założeń gospodarczych zakładających minimali-

zację zużycia energii [Dyrektywa 2005/32/WE]. Oświetlenie jest jednym z najważniejszych czynników, które gwarantują mieszkańcom poczucie bezpieczeństwa i komfortu w przestrzeni miejskiej w porze nocnej. Rozwój energooszczędnych źródeł światła spowodował częstsze wykorzystanie oświetlenia w przestrzeni zewnętrznej także w celu zwiększenia wartości estetycznych przestrzeni miejskich. Ze względu na stosunkowo niską cenę i wysoką wydajność najczęściej wprowadzanymi rozwiązaniami oświetlania zewnętrznego są systemy wykorzystujące zjawisko elektroluminescencji. Układy oświetleniowe tego typu składają się z półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowa-

nie w zakresie światła widzialnego (light-emitting diode – LED). W procesie elektroluminescencji powstaje promieniowanie w wąskim zakresie widma (źródła światła monochromatycznego). Pierwszym sposobem otrzymania światła białego jest umieszczenie w jednej obudowie chipów LED o zróżnicowanym zakresie emisji (np. dioda RGB). W wyniku addytywnego sumowania barw otrzymywany jest biały kolor światła. Wadą tego rozwiązania są wysokie koszty produkcji związane ze skomplikowanym systemem zasilania. Drugim sposobem uzyskania światła białego jest zastosowanie luminoforu, którym pokrywa się diodę LED promieniującą w paśmie nadfioletu (UV LED). Luminofor składa się z trzech warstw, z których każda realizuje konwersję światła UV na jedną z trzech barw podstawowych (niebieską, zieloną i czerwoną). Diody tego typu wykazują mniejszą sprawność niż diody RGB, ponieważ występują tu straty na luminoforze związane z konwersją światła. Aktualnie do oświetlenia wewnętrznego najintensywniej rozwijana jest metoda hybrydowa, która wykorzystuje różne połączenia obydwu wyżej wymienionych rozwiązań. Najtańsze, a zarazem najczęściej stosowane w systemach oświetlenia zewnętrznego jest rozwiązanie z zastosowaniem chipów LED o emisji w paśmie UV i warstw luminoforów. W przypadku tej technologii istnieje możliwość emisji promieniowania UV. Ten typ diod charakteryzuje się także wysokim udziałem w zakresie widmowym światła niebieskiego [Behar-Cohen et al. 2011].

Celem niniejszego artykułu była ocena czy nowoczesne oświetlenie energooszczędne oparte na technologii LED może być źródłem zagrożenia dla mieszkańców miast.

WPŁYW WIDM BIOLOGICZNIE CZYNNYCH NA ZDROWIE LUDZI

Szczególnie niebezpieczna dla zdrowia ludzi jest nadmierna ekspozycja na promieniowanie w zakresie UV. Najwrażliwszym elementem jest aparat wzroku. Tkanki oka w znacznym stopniu absorbują promieniowanie UV. Najczęściej występującym, ostrym objawem narażenia oka na nadmierne krótkotrwałe promieniowanie w zakresie UV jest stan zapalny rogówki i spojówki. Absorpcja promieniowania o długości fali poniżej 290 nm powoduje najczęściej stany zapalne rogówki objawiające się światłowstrętem, wzmożonym łzawieniem, spazmem powiek, niekie-

dy także upośledzeniem widzenia. Maksymalną skuteczność wywoływania zapalenia rogówki posiadają fale o długości 270 nm, a wartość progowa napromienienia dla powstania tego objawu wynosi 40 J/m². Maksymalną skutecznością wywoływania zapalenia spojówek charakteryzują się natomiast fale o długości 260 nm. Wartość progowa napromienienia dla wystąpienia tego typu objawów wynosi 50 J/m². Promieniowanie UV powyżej 300 nm dociera do siatkówki oka i może być przyczyną powstawania schorzeń lub uszkodzeń siatkówki o charakterze fotochemicznym [Pościk et al. 2009].

Do najczęstszych schorzeń związanych z długotrwałą nadmierną ekspozycją oka na promieniowanie UV jest zaćma. Promieniowanie w paśmie nadfioletu przyczynia się także do nasilenia procesów zwyrodnienia plamki żółtej oraz może zwiększyć prawdopodobieństwo powstawania nowotworów skóry powiek i oczu (np. czerniak naczyniówki). Ponadto wysokie dawki promieniowania UV przyczyniają się do rozwoju immunosupresji, która coraz częściej uznawana jest za ważny czynnik sprzyjający powstawaniu nowotworów skóry [Balk 2011]. Przy określaniu zagrożenia związanego z ekspozycją na sztuczne promieniowanie UV wyznaczono funkcję skuteczności widmowej w wywoływaniu zapalenia rogówki i spojówki oka, erytemy, oraz raka skóry tzw. skuteczność aktywną $S(\lambda)$. Funkcja ta przyjmuje wartości maksymalna przy 270 nm i zawiera się w przedziale widmowym od 200 do 400 nm [Pościk et al. 2009].

Promieniowanie z zakresu widma niebieskiego ma niższą energię niż promieniowanie UV charakteryzują się jednak znacznie większą przenikliwością (więcej promieni dociera do siatkówki oka). Aktualne badania wskazują, że ekspozycja na światło niebieskie w zakresie od 400-470 nm (nawet przy niskich poziomach) może spowodować uszkodzenie fotoreceptorów i komórek nabłonka barwnikowego siatkówki. Długotrwała ekspozycja na jego działanie może powodować przemęczenie oczu, a nawet prowadzić do uszkodzenia siatkówki i zwyrodnienia plamki żółtej [Tosini et al. 2016].

Światło jest jednym z kluczowych czynników regulujących rytm biologiczny organizmów żywych. Nawet niewielka ekspozycja na światło może powodować zaburzenia rytmu snu i czuwania poprzez oddziaływanie na układ hormonalny. Dla powstrzymania wydzielania melatoniny (kluczowego hormonu odpowiedzialnego za re-

gulację cyklu dobowego) u dzieci potrzebna jest ekspozycja na światło o natężeniu 0,2–0,3 W/m² przez 25–30 min. U dorosłych osób wartości te mogą być wyższe i wynosić ok. 0,6W/m² [Ronchi 2012]. Melatonina oprócz kluczowej roli w regulacji cyklu snu i czuwania okołodobowych jak i sezonowych odpowiada także za procesy antyoksydacyjne, wzmacnianie odpowiedzi układu immunologicznego oraz odpowiada za regulację poziomu cholesterolu we krwi [Srinivasan et al. 2005, Karasek 2007, Pandi-Perumal et al. 2012].

METODYKA

W celu oceny prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka ze strony oświetlenia opartego o technologię LED przeprowadzono pomiary 3 lamp LED firmy EcoEnergy, które charakteryzowały się parametrami technicznymi przedstawionymi w tabeli 1. Wykorzystywane do eksperymentu źródła światła przepracowały taką samą ilość godzin. Szacowany czas pracy urządzeń (ok. 100 h).

Tabela 1. Parametry techniczne badanych lamp typu LED

Table 1. Technical parameters of tested LED lamp

Parametr	Wartość
Strumień świetlny	4900 lm
Temperatura barwowa	6000
Napięcie zasilania	230 V
Pobór mocy	70 W
CRI (współczynnik oddawania barw)	>70

Wykonanie pomiaru

W ramach badań przeprowadzono pomiar intensywności promieniowania w zakresie widm biologicznie czynnych UVA, UVB oraz światła niebieskiego. Pomiary zostały przeprowadzone zgodnie z normą EN 62471 oraz wytycznymi prowadzenia pomiaru w zakresie promieniowania UV [Pawlak 2012]. Pomiar prowadzony był zarówno w miejscu, gdzie natężenie oświetlenia z badanej lampy wynosiło 500 lx (wytyczne dla lamp stosowanych w oświetleniu ogólnym), jak i w odległości 200mm od źródła światła (ocena pozostałych rodzajów światła). Dla każdego przypadku wykonano 14 powtórzeń pomiaru. Uzyskane wyniki odniesiono do znormalizowanych funkcji skuteczności widmowej zawartych w Dyrektywie 2006/25/WE oraz wartości granicznej

ekspozycji z literatury specjalistycznej. Pozwoliło to na oszacowanie potencjalnego skutku ekspozycji na promieniowanie optyczne z badanych źródeł światła.

Urządzenie pomiarowe

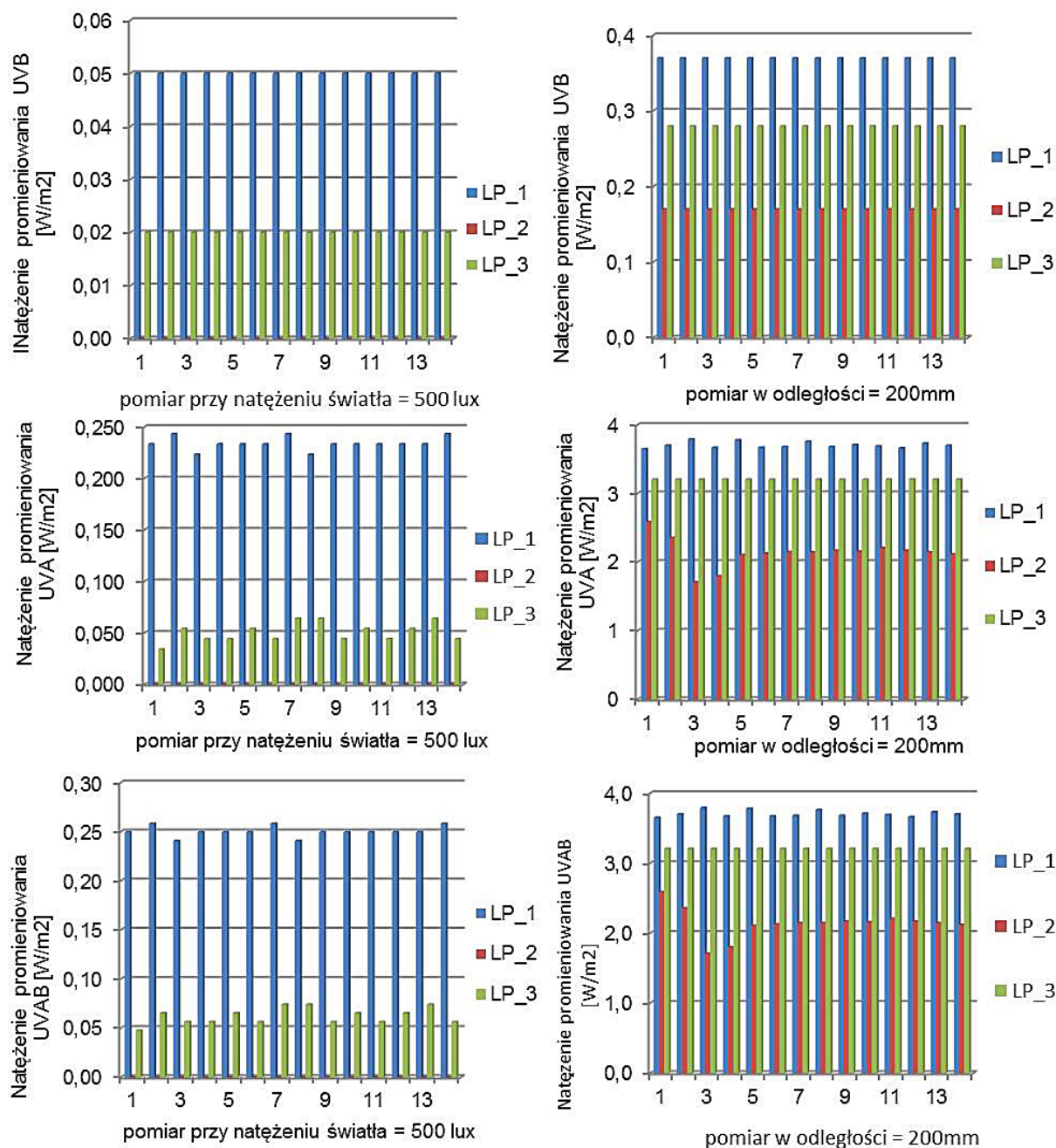
Pomiar przeprowadzono za pomocą czujnika składającego się z trzech fotodiodowych detektorów, układów wzmacniaczy, przetwornika A/C, mikroprocesora, zasilania z ładowarką ogniw litowo-jonowych. Do budowy czujnika zastosowano detektor SG01S-B18 o zakresie detekcji od 231 nm do 309 nm (UVB), ML8511 o zakresie detekcji od 290 nm do 390 nm (UVA) oraz S9702 o zakresie detekcji od 400 nm do 500 nm (rys. 1). Zastosowany układ detekcji pozwala na pomiar promieniowania od 10uW/cm² przy poziomie szumu 0.1 uW/cm². Charakterystyka spektralna detektora SG01S-B18 pokrywa się z krzywą skuteczności aktywności promieniowania UV w ponad 80% [Pościk et al. 2009, Sonnenberg et. al. 2015].

Wartości natężenia w zakresie UVAB otrzymano sumując wartości odczytane z czujnika UVB (231 nm do 309 nm) oraz czujnika UVA (290 nm do 390 nm). Od otrzymanej wartości odjęto procent, który stanowi stosunek zakresu, w którym obydwie czujniki mają wspólny zakres detekcji (290–309 nm) do łącznego zakresu detekcji w zakresie promieniowania UV (231–390 nm). Kąt bryłowy niezbędny dla promieniowania w zakresie światła niebieskiego wyliczono zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w pracy Pawlak [2012]. Kalibracji czujników dokonano na podstawie parametrów technicznych detektorów wykonanych przez producenta tych urządzeń oraz pomiarów z wykorzystaniem lampy rtęciowej o znanej poziomie emisji oraz spektrometru skanującego.

WYNIKI

Wyniki pomiarów promieniowania UV w zakresie UVB i UVA oraz obliczone wartości promieniowania w zakresie UVAB zaprezentowano rysunku 1. Natężenie promieniowania UVB, UVA i UVAB wykazywały zróżnicowane wartości w poszczególnych egzemplarzach badanych lamp.

Wyniki klasyfikacji lamp pod względem ryzyka zagrożenia zdrowia ludzi spowodowanego promieniowaniem UV w zakresie aktywnym



Rys. 1. Wyniki natężenia promieniowania UVB, UVA i UVAB 3 lamp LED (LP_1, LP_2, LP_3) dla pomiaru w miejscu gdzie natężenia oświetlenia z badanej lampy wynosiło 500 lx oraz w odległości 200 mm od źródła światła (n = 14)

Fig. 1. Irradiance intensity of UVB, UVA and UVAB radiation from 3 LED lamps (LP_1, LP_2, LP_3) with evaluation at 500 lx and at a distance of 200 mm from the light source (n = 14)

przedstawiono w tabeli 2. Lampa nr 1 została zaklasyfikowana do grupy o najwyższym współczynniku ryzyka pod względem natężenia promieniowania w zakresie najbardziej szkodliwym dla aparatu wzroku (zakres UVB). Pod względem tego parametru do grupy o średnim ryzyku została zaklasyfikowana lampa nr 3, natomiast wartość natężenie promieniowania UVB z lampy numer 2 klasyfikują ją w grupie o akcepto-

walnym ryzyku. Obliczone czasy ekspozycji niezbędne do wywoływania zapalenia rogówki (40 J/m²) i zapalenia spojówek z poszczególnych lamp zestawiono w tabeli 3.

Wyniki pomiarów promieniowania UV w zakresie światła niebieskiego zaprezentowano na rysunku 2. Wyniki klasyfikacji lamp pod względem ryzyka zagrożenia zdrowia ludzi spowodowanego promieniowaniem w zakresie

Tabela 2. Wartości graniczenie dla poszczególnych grup ryzyka w odniesieniu do zagrożenia aktywnym promieniowaniem UV przy natężeniu światła =500 lux (zakres detektora UVB)

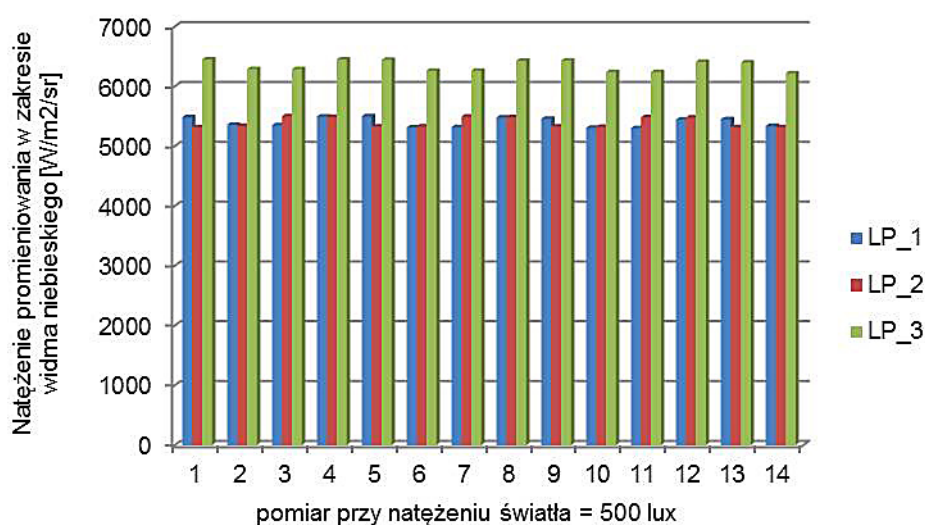
Table 2. Limits for assessment of the actinic UV radiation hazard (risk group classification) with evaluation at 500 lx (the range of UVB detector)

Gupy ryzyka	Wartości graniczenie		Klasyfikacja lamp pod względem ryzyka
	W/klm	W·m ²	
RG0 (ryzyko akceptowalne)	≤2	0,001 W·m ²	Lampa 2
RG1 (niskie ryzyko)	>2 ≤ 6	0,001–0,0029	
RG 2 (średnie ryzyko)	>6 ≤ 60	0,003–0,03	Lampa 3
RG3 (wysokie ryzyko)	>60	>0,03	Lampa 1

Tabela 3. Wartości graniczenie ekspozycji dla wywołania ostrych stanów chorobowych aparatu wzroku przez promieniowanie UV

Table 3. Exposure limits for acute UV-induced eye diseases

Objaw ostry	Wartość progowa ekspozycji	Odległość od źródła	Lampa	Czas ekspozycji [min]
Zapalenie rogówki	40 J/m ²	Natężenie światła 500 lx	1	13,3
			2	nie stwierdzono promieniowania
			3	33,3
		200 mm od źródła światła	1	1,8
			2	3,9
			3	5,2
Zapalenie spojówek	50 J/m ²	Natężenie światła 500 lx	1	16,7
			2	nie stwierdzono promieniowania
			3	41,7
		200 mm od źródła światła	1	2,3
			2	4,9
			3	3,0



Rys. 2. Wyniki natężenia promieniowania widma niebieskiego 3 lamp LED (LP_1, LP_2, LP_3) dla pomiaru w miejscu gdzie natężenia oświetlenia z badanej lampy wynosiło 500 lx (n = 14)

Fig. 2. Irradiance intensity of the blue light radiation from 3 LED lamps (LP_1, LP_2, LP_3) with evaluation at 500 lx (n = 14)

Tabela 4. Wartości graniczenia dla poszczególnych grup ryzyka w odniesieniu do zagrożenia promieniowaniem w zakresie widma niebieskiego według normy EN 62471

Table 4. Limits for assessment of the blue light radiation hazard (risk group classification) with evaluation at 500 lx (the range of UVB detector)

Grupy ryzyka	Wartość LB (W/m ² /sr)	Czas ekspozycji (s)	Klasyfikacja lamp pod względem ryzyka
RG 0 brak ryzyka	0–100	nie określono czasu maksymalnego	
RG 1 niskie	100–10 000	100–10 000	
RG 2 umiarkowane	10 000–4 000 000	0,25–100	
RG 3 wysokie	>4 000 000	<0,25 (odruch odwrócenia wzroku)	lampa 1, 2, 3

światła niebieskiego przedstawiono w tabeli 4. Wartości natężenia promieniowania w widmie światła niebieskiego klasyfikują badane lampy w grupie o wysokim ryzyku zagrożenia tym zakresem promieniowania. Natężenia tego promieniowania przekraczają także wartości niezbędne do wywołania efektu blokady wydzielania melatoniny (0,6 W/m²).

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki wskazują, że systemy oświetlenia energooszczędne typu LED, mogą być źródłem promieniowania, które znacząco negatywnie oddziałuje na wzrok (m. in. powodować uszkodzenia siatkówki, zaćmy, zapalenie rogówki) oraz wpływać na zaburzenie cyklu dobowego. Do oświetlenia miejskiego stosuje się mniejsze wartości natężenia światła niż warunki pomiaru przyjęte dla zastosowanej w niniejszej pracy oceny ryzyka (pomiar zgodnie z normą EN 62471). Niemniej w warunkach mniejszej intensywności oświetlenia, większa część promieniowania o wysokiej energii może docierać do wrażliwych elementów aparatu wzroku. Jest to związane z mniejszym pochłanianiem promieniowania UV przez barwniki w tęczówce oka [Van Kuijk 1991, Löfgren et al. 2012]. Dla pełnej oceny bezpieczeństwa fotobiologicznego miejskiego oświetlenia energooszczędne niezbędne jest przeprowadzenie pomiaru ekspozycji mieszkańców na promieniowania o największym negatywnym oddziaływaniu na zdrowie. Konieczność prowadzenia tych badań wynika z faktu, że poszczególne egzemplarze lamp mogą znacząco różnić się pod względem emisji szkodliwego promieniowania. Jest to prawdopodobnie zależne od precyzji wykonania warstw luminoforu odpowiedzialnego za konwersję promieniowania UV na poszczególne barwy światła widzialnego. Ze

względu na możliwość zużywania się luminoforów, a co za tym idzie wzrost udziału promieniowania szkodliwego w strumieniu światła emitowanego przez oprawy typu UV LED, konieczne wydaje się także okresowe sprawdzanie eksploatowanego oświetlenia pod względem bezpieczeństwa fotobiologicznego.

Nowoczesne oświetlenie typu LED charakteryzuje się wysokim udziałem w zakresie widmowym światła niebieskiego. Znajomość zależności pomiędzy ekspozycją na światło niebieskie, a wydzielaniem hormonów pozwala na identyfikację potencjalnego wpływu sztucznego oświetlenia na naturalny rytm dobowy człowieka [Behar-Cohen et al. 2011]. Niezbędne jest zatem ustanowienie bezpiecznej wartości granicznej dla natężenia promieniowania w widmie światła niebieskiego w porze wieczornej i nocnej w celu ograniczenia negatywnych skutków zaburzenia rytmu dnia i nocy wśród mieszkańców miast. Ponadto nowoczesne oświetlenie powinno dopasowywać się do rytmu dobowego człowieka zapewniając dostarczenie dużej dawki światła niebieskiego w godzinach porannych i ograniczenie tego zakresu światła w godzinach wieczornych i nocnych [Falchi et al. 2011].

LITERATURA

1. Balk S.J. 2011. Promieniowanie ultrafioletowe: zagrożenie dla dzieci i młodzieży. *Pediatrics po Dyplomie* 15(3), 10-22.
2. Behar-Cohen F., Martinsons C., Viénot F., Zissis G., Barlier-Salsi A., Cesarini J.P., Enouf O., Garcia M., Picaud S., and Attia D. 2011. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? *Progress in Retinal and Eye Research*, 30(4), 239-257.
3. Dyrektywa 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 lipca 2005 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących

- ekoprojektu dla produktów wykorzystujących energię oraz zmieniająca dyrektywę Rady 92/42/EWG oraz dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 96/57/WE i 2000/55/WE
4. Dyrektywa 2006/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (szkodliwym promieniowaniem optycznym).
 5. Falchi F., Cinzano P., Elvidge C.D., Keith D.M. and Haim A. 2011. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *J Environ Manage.* 92(10), 2714-2722.
 6. Karasek M. 2007. Znaczenie kliniczne melatoniny. *Postępy Nauk Medycznych* 10, 395-398.
 7. Löfgren S., Michael, R. and Söderberg, P.G. 2012. Impact of iris pigment and pupil size in ultraviolet radiation cataract in rat. *Acta Ophthalmologica*, 90(1), 44-48.
 8. Morita T. Tokura H. 1998. The influence of different wavelengths of light on human biological rhythms. *Applied Human Science*, 17(3), 91-96.
 9. Pandi-Perumal S. R., BaHamman A. S., Spence D. W., Brown G.M., Bharti V.K., Kaur C., Hardeland R. and Cardinali, D. P. (2012). Melatonin antioxidative defense: therapeutical implications for aging and neurodegenerative processes. *Neurotoxicity Research*, 23(3), 267-300.
 10. Pawlak A. 2012. Zasady wykonywania pomiarów promieniowania optycznego na stanowiskach pracy. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 255(12), 67-77.
 11. Pościk A. Wolska A. and Owczarek G. 2009. Ocena narażenia na promieniowanie nadfioletowe z zastosowaniem indywidualnych fotochromowych dozymetrów. Warszawa, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.
 12. Reiter R.J. 1980. The pineal gland and its hormones in the control of reproduction in mammals. *Endocrine Reviews*, 1, 109-131.
 13. Ronchi L. R. 2012. On the interacting visual and non-visual effects. Lucia Ronchi.
 14. Sonnenberg R., Weiss T., and Hopfenmüller G. 2015. Properties of the SG01S-B18 UV photodiode. sglux GmbH. Dostępne na stronie: <http://www.scitec.uk.com/uvphotodiodes/datasheets/sg01s-b18.pdf>.
 15. Srinivasan V., Maestroni G. J., Cardinali D.P., Esquifino A. I., Pandi-Perumal S.R. and Miller S.C. 2005. Melatonin, immune function and aging *Immunity & Ageing*, 2(17), 1-10.
 16. Tosini G., Ferguson I. and Tsubota K. 2016. Effects of blue light on the circadian system and eye physiology. *Molecular Vision*, 22, 61-72.
 17. Van Kuijk F. J. 1991. Effects of ultraviolet light on the eye: role of protective glasses. *Environmental Health Perspectives*, 96, 177-184.
 18. Waldhauser F., Boepple P.A., Schemper M., Mansfield M.J. and Crowley W.F. 1991. Serum melatonin in central precocious puberty is lower than in age-matched prepubertal children. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 73, 793-796.