



PROJEKTOWANIE OŚWIETLENIA WYDAJNEGO BIOLOGICZNIE w świetle badań naukowych Październik, 2011

Streszczenie:

Zarys zagadnienia

Przez długi czas oświetlenie projektowane było pod kątem umożliwiania widzenia otoczenia. Mniejszą wagę przykładano do innych efektów wywieranych przez światło, choć wiadomo, że odpowiednie oświetlenie jest niezbędne dla dobrego samopoczucia, nastroju i zdrowia. Te efekty są jednak trudne do uwzględnienia, ponieważ zwykle zależą w dużym stopniu od indywidualnej oceny panujących warunków. Podejście to zmieniło się znacząco po tym, jak na początku obecnego stulecia w oku ludzkim, obok pręcików i czopków wykryto trzeci fotoreceptor. Światło pobudzające ten receptor, zwany ipRGC (samoistnie światłoczuła komórka zwojowa siatkówki) ma bezpośrednie oddziaływanie na rytm biologiczny. Oznacza to, że rytmy w organizmie człowieka, takie jak cykl snu i czuwania, dzienne zmiany koncentracji, wydajności i nastroju (zmiany okołodobowe) oraz reakcje na zmiany sezonowe są uzależnione od określonych warunków świetlnych, które są odbierane przez układ tych receptorów i dalej przez powiązane z nimi obszary w mózgu, odpowiedzialne za ich przetwarzanie.

Jak projektować oświetlenie wydajne biologicznie

Receptory ipRGC są najsilniej stymulowane przez światło w zakresie fal niebieskich, a najwyższa czułość przypada na promieniowanie o długości fali ok. 480 nm. Ta część pasma widzialnego w niskim stopniu decyduje o postrzeganiu jasności światła, uzależnionej od indywidualnej wrażliwości wzrokowej, jednak jest niezbędna dla zdolności odróżniania dnia od nocy. Ponieważ receptory światłoczułe są rozmieszczone na całym obszarze siatkówki, do ich pobudzenia niezbędne jest światło padające z górnej półprzestrzeni i szeroko rozproszone. Szczególnej uwagi wymaga pora ekspozycji na światło, która powinna odpowiadać uwarunkowaniom chronobiologicznym człowieka. Można to uzyskać stosując biologicznie wydajne oświetlenie w ciągu dnia oraz biologicznie neutralne oświetlenie w porze wieczornej i nocnej, nie zakłócające naturalnego uczucia senności oraz snu.

Istotny jest fakt, że starsze osoby wymagają znacznie większej ilości światła, nie tylko do zapewnienia właściwego widzenia, ale także prawidłowego przebiegu procesów biologicznych. U tych osób znacznie zmniejszona jest ilość światła niebieskiego przenikającego przez oko (rogówkę, soczewkę i ciało szkliste), co powoduje osłabienie rytmu okołodobowego oraz zaburzenia snu, objawiające się częstymi drzemkami w ciągu dnia, utrudnionym zasypianiem i niespokojnym snem.

Wnioski

Chociaż priorytet zmniejszenia śladu węglowego oświetlenia nie podlega dyskusji, fakty naukowe wskazują także na konieczność spełnienia przez nie pewnych kryteriów jakościowych, wynikających ze względów zdrowotnych. Ponadto oświetlenie stosowane dla celów stymulacji biologicznej nie może być mierzone i oceniane za pomocą kryteriów wydajności energetycznej, które opierają się na czułości organów wzrokowych. W nowoczesnych społeczeństwach ludzie dłużej przebywają w zamkniętych pomieszczeniach i dłużej żyją, dlatego coraz ważniejszym priorytetem staje się urządzenie wnętrz w sposób korzystny dla zdrowia. Oświetlenie nie jest neutralne dla zdrowia, dlatego nieuwzględnienie nowych odkryć dotyczących biologicznego oddziaływania światła może powodować niekorzystne efekty, takie jak zaburzenia cyklu snu i czuwania, zaburzenia nastroju, a potencjalnie także zmiany nowotworowe (zob. klasyfikacja IARC (1) oraz WHO). Dlatego też istnieje potrzeba opracowania oferty lamp o zróżnicowanym oddziaływaniu biologicznym, opraw umożliwiających lepsze oświetlenie górnej części pomieszczeń oraz układów sterowania oświetleniem, które umożliwiają włączanie oświetlenia w odpowiednim czasie. Wiemy, że poprawa jakości oświetlenia ma wpływ na wzrok, a według najnowszej wiedzy także na ogólny stan zdrowia.

Wstęp

Biologiczny wpływ światła na człowieka uważa się obecnie za główny trend w naukowych badaniach nad oświetleniem i branży oświetleniowej. Od czasu niedawnego odkrycia w oku ludzkim trzeciego fotoreceptora, obok już znanych czopków i pręcików, obserwuje się intensywny rozwój badań nad tzw. biologicznym wpływem światła, czyli aspektami niezwiązanymi z funkcją oświetlania otoczenia. Oddziaływanie to następuje poprzez samoistnie światłoczułe komórki zwojowe siatkówki (komórki ipRGC). Ich właściwości i wpływ na działanie rytmu okołodobowego oraz zdrowie człowieka były i są obiektem wielu badań. Istnieją obszerne dowody naukowe wskazujące, że biologiczne oddziaływanie światła ma istotne znaczenie dla naszej wydajności, samopoczucia i zdrowia. Należy je zatem uwzględnić w dążeniach do zwiększania jakości oświetlenia i jego wydajności energetycznej.

Wiele dyscyplin, takich jak chronobiologia, okulistyka, naukowe podstawy oświetlenia, a także psychiatria przyczyniły się do zgromadzenia naszej obecnej wiedzy o wpływie światła na rytm biologiczny i zdrowie człowieka. Pomimo tego postępu nadal wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi. Dlatego pojawiają się głosy krytyczne mówiące o tym, że nasza dotychczasowa wiedza nie jest wystarczająca do zastosowania w oświetleniu ogólnym. Jednak wprowadzanie nowych odkryć do praktyki już się rozpoczęło, a pierwsze wyniki potwierdzają nasze aktualne poznanie mechanizmów oddziaływania światła na człowieka oraz możliwości realizacji niektórych koncepcji. Szybko ustanowione podstawy biologicznego oddziaływania światła na człowieka doprowadziły do rozpoczęcia prac nad stworzeniem norm, czego wynikiem było opublikowanie wstępnej normy w roku 2009 w Niemczech (2).

Niniejszy artykuł stanowi przegląd odkryć dotyczących biologicznego oddziaływania światła na człowieka i wskazuje obszary, w których obecnie możliwe jest już wykorzystanie wyników badań naukowych.

1. Skład widmowy światła i źródeł światła

Opublikowano wiele badań na temat widma oddziaływania komórek ipRGC oraz ich barwnika światłoczułego, melanopsyny, przeprowadzonych na człowieku i zwierzętach. Istnieją niewielkie rozbieżności między tymi pracami w odniesieniu do długości fal odpowiadającej maksymalnej czułości, wynikające z różnych źródeł pochodzenia komórek lub barwnika, oraz rodzaju otoczenia komórkowego lub molekularnego, jednak całkowity

zakres tych wartości przypada jedynie na wąski przedział od 460 nm do 480 nm. Istnieją także dwa nieco odmienne modele funkcji czułości komórek na światło, co może mieć znaczenie dla wpływu światła polichromatycznego na człowieka. Modele Galla (3) oraz Rea (4) różnią się pod względem wpływu światła w zakresie fal zielonych. Jednak w odniesieniu do światła białego, odpowiadającego typowym zastosowaniom oświetlenia we wnętrzach, różnice między tymi modelami powinny być niewielkie. Ogólnie rzecz biorąc, jednoznacznie stwierdzono, że niebieska część widma światła oddziałuje na rytm okołodobowy, powodując zahamowanie wydzielania melatoniny i uruchomienie wewnętrznego zegara wewnętrznego, w postaci 24-godzinnej cyklu światła i ciemności.

Gall (3) zaproponował miarę zwaną "wskaźnikiem okołodobowym", która umożliwia praktyczną ocenę lamp pod względem widma oddziaływania. Miarę tę zastosowano w pierwszej normie wstępnej, dotyczącej pojęć i definicji w zakresie biologicznego oddziaływania światła, którą wydano w Niemczech w czerwcu 2009 r. pod nazwą DIN V 5031-100 (2). Jej celem było umożliwienie opisu światła w odniesieniu do jego efektów biologicznych. Taki opis jest niezbędny do uzupełnienia ilościowej oceny światła, poprzez dodanie wielkości związanej z wpływem biologicznym do danych fotometrycznych w zakresie jakości i wydajności energetycznej. Uzyskanie równowagi między jakością a wydajnością jest konieczne dla ludzkiego zdrowia jak i zrównoważonego rozwoju.

Zaproponowana miara oceny światła pod względem jego oddziaływania biologicznego powinna być wykorzystana do opracowania metody klasyfikacji oświetlenia pod względem zarówno wydajności energetycznej, jak i biologicznej. Dotychczasowa interpretacja pojęcia efektywności energetycznej dotyczyła jedynie wydajności w odniesieniu do oświetlania otoczenia. Nie jest to wystarczające z punktu widzenia definicji jakości światła.

2. Rozkład przestrzenny światła w pomieszczeniach

Biologiczne oddziaływanie światła odbywa się poprzez absorpcję fotonów w komórkach ipRGC, jednak nie kończy się powstaniem obrazu danego przedmiotu w mózgu. Równomierny rozkład światła niebieskiego w przyrodzie wynika z jego rozproszenia przez atmosferę, w wyniku czego powstaje "półkula", z której światło pada od góry na dolną część siatkówki oka. Tak padające światło stanowi odpowiedni bodziec dla komórek ipRGC. Komórki te są rozproszone na całym obszarze siatkówki, ale w części dolnej wykazują wyższą czułość świetlną niż w górnej. Aby światło wywierało odpowiednie efekty biologiczne, musi docierać do dużej liczby receptorów, podobnie jak naturalne światło słoneczne. W pomieszczeniach pozytywne efekty da oświetlenie padające od góry i o szerokim kącie bryłowym, np. umieszczone na suficie i górnej części ścian. Efektywność biologiczna oświetlenia wymaga zatem odpowiedniego planu rozmieszczenia źródeł światła i zastosowania odpowiednich opraw, a także dużego udziału oświetlenia pośredniego lub tzw. układu warstwowego, co zapewni właściwe natężenie światła padającego od góry.

3. Efekty związane z porą doby, rytmy okołodobowe i stymulacja przez światło dzienne

Naturalne światło słoneczne jest bardzo zróżnicowane, szczególnie pod względem natężenia, ale także temperatury barwowej. Jak wiemy, światło słoneczne zmienia się cyklicznie w ciągu doby. Odpowiednie oświetlenie sztuczne powinno wzorować się na oświetleniu naturalnym. Oddziaływanie światła na zegar wewnętrzny wymaga stosowania oświetlenia w zgodzie z rytmem okołodobowym organizmu użytkownika. W przyrodzie biologiczny wpływ światła wynika z jego charakterystyki widmowej oraz natężenia, i jest największy zwykle około południa, a najmniejszy w nocy. Taki cykl można symulować poprzez ściemnianie części źródeł światła o określonej barwie w taki sposób, by zachować białą barwę światła, ale zmieniać udział niebieskiej części promieniowania, odpowiednio do danej pory dnia.

Światło o ciepłej barwie ma ograniczony wpływ biologiczny i umożliwia dobre oświetlenie otoczenia, nie zaburzając w znacznym stopniu wieczornej fazy rytmu okołodobowego. Światło chłodniejsze, tzn. o zwiększonym udziale promieniowania niebieskiego, można stosować w ciągu dnia, by uzyskać odpowiednie oświetlenie i jednocześnie zadbać o koncentrację i odpowiedni wpływ na naturalny rytm okołodobowy.

Dzięki nowoczesnym układom sterowania oświetleniem, stosującym m. in. czujniki światła oraz sterowanie inteligentne, powyższe można osiągnąć przy jedynie niewielkim obniżeniu wydajności energetycznej i jednoczesnej poprawie jakości oświetlenia.

4. Starzenie się oka a widmo promieniowania

Wiemy dobrze, że oko ludzkie podlega procesom starzenia, które obniżają jego wrażliwość. W wyniku tego do prawidłowego widzenia niezbędne jest silniejsze światło. Z wiekiem zmienia się w szczególności przepuszczalność oka dla światła. Już od 20-25 roku życia soczewka oka ludzkiego stopniowo żółknie, co powoduje odfiltrowanie części promieniowania widzialnego o krótszej długości fali. W przypadku osób starszych efekty te są jeszcze silniejsze w odniesieniu do oddziaływania na rytm okołodobowy organizmu. Ma to duże znaczenie dla projektowania oświetlenia dla starzejącej się populacji, ponieważ osoby starsze mają znacznie więcej problemów z zaburzeniami rytmu dnia i nocy oraz jakością snu. Najnowsze badania dowodzą także, że istnieje powiązanie między objawami u osób cierpiących na demencję (np. choroba Alzheimera) a zaburzeniem rytmu snu. Istnieje wiele badań potwierdzających taki związek, a niedawno opublikowano wyniki badań klinicznych, w których udowodniono pozytywny wpływ światła o wysokim natężeniu na osoby cierpiące na demencję (5).

5. Obszary zastosowania oświetlenia o korzystnym wpływie na rytm dnia i nocy

Złożoność chronobiologii i ciągle nieliczne dowody na korzystny wpływ niektórych rozwiązań na użytkownika mogłyby potencjalnie zniechęcać do szerszego zastosowania oświetlenia efektywnego biologicznie w oświetleniu ogólnym. Z drugiej strony jednak wiele badań wykazało już takie korzystne efekty, nie tylko u osób starszych, ale także u pracowników pomieszczeń biurowych i przemysłowych. W przyszłości pożądanym jest przeprowadzenie dalszych badań terenowych, które umożliwią wdrożenie zasad stosowania oświetlenia optymalnego biologicznie. Istnieją już takie scenariusze aplikacyjne, w których zaleca się wykorzystanie biologicznego efektu światła. Istnieje zgodność co do stosowania oświetlenia korzystnego biologicznie w miejscach zamieszkania osób starszych, w szczególności osób chorych na demencję. Te grupy osób często są pozbawione dostępu do światła naturalnego w odpowiedniej ilości.

Dodatkowa ekspozycja na światło, najlepiej o wyższym udziale światła niebieskiego, wspomaga stabilizację rytmu okołodobowego i ma korzystny wpływ na sen oraz koncentrację w ciągu dnia. Fakt wpływu światła na rytm okołodobowy jest od lat wykorzystywany w leczeniu osób chorych na sezonowe zaburzenie afektywne; najnowsze badania naukowe wykazały również bardzo obiecujące wyniki dotyczące wpływu światła na osoby cierpiące na depresje niesezonowe oraz inne zaburzenia psychiczne. Od pierwszego zastosowania na tym polu oświetlenie korzystne biologicznie stale dostarcza dowodów na pozytywne oddziaływanie na rytm biologiczny u pacjentów z pozasezonowymi jak i sezonowymi zaburzeniami depresyjnymi. Biologiczny wpływ światła zaleca się wykorzystywać nie tylko w celu osiągnięcia określonych efektów, na przykład przesunięcia fazy cyklu dobowego i eliminacji objawów jet-lagu lub w terapii psychiatrycznej, ale również dla celów pozaleczniczych. Nawet w trakcie codziennej pracy większość pracowników zgłasza objawy podobne do objawów jet-lagu. Wynikają one z zasad społecznych, szczególnie z

powszechnie przyjętych godzin otwarcia miejsc pracy, nie uwzględniających wrodzonych wymagań chronobiologicznych poszczególnych osób. Objawy tzw. społecznego jet-lagu obniżają wydajność snu i sprawność pracy. Ma to miejsce szczególnie w poniedziałki, kiedy wiele osób ma trudności z obudzeniem się o wcześniejszej porze niż podczas weekendu. Na sen i wydajność niekorzystnie wpływa niedostateczny poziom oświetlenia w miejscu pracy, szczególnie niebieskiej części widma promieniowania (6). Powinna ona mieć wysoki udział i szeroki rozkład przestrzenny w ciągu dnia, co skutecznie hamuje wydzielanie melatoniny i stanowi wyraźny sygnał aktywności dziennej dla wewnętrznego rytmu organizmu. Można to uzyskać poprzez wykorzystanie światła słonecznego w oświetleniu pomieszczeń lub symulację światła słonecznego za pomocą odpowiedniego oświetlenia sztucznego. Z kolei w godzinach wieczornych część promieniowania świetlnego, na które najbardziej reagują komórki ipRGC powinna być zredukowana, a w nocy obniżona do minimum, co stanowi sygnał informujący organizm o ciemności i pobudza uwalnianie melatoniny we właściwej porze doby, w trakcie snu. Wyższa stabilność rytmu dnia i nocy, a także odpowiednie zróżnicowanie udziału światła niebieskiego mogą mieć pozytywne efekty zdrowotne.

Nasza obecna wiedza nie daje jednoznacznych wskazówek w kwestii oświetlenia miejsc pracy zmianowej. Doświadczenie wskazuje na niekorzystny wpływ takiej pracy na zdrowie i wydajność pracowników, wynikający z chronicznego zakłócenia rytmu dnia i nocy. Brak jest jednak danych i wskazówek dotyczących optymalizacji nocnych warunków oświetleniowych w celu zminimalizowania tych niekorzystnych efektów. Z punktu widzenia chronobiologii najlepiej byłoby całkowicie przesunąć fazę rytmu okołodobowego i przyzwyczaić pracownika do zmienionego rytmu także w dni wolne. Miałyby to jednak istotne i potencjalnie niekorzystne konsekwencje dla codziennego życia. Drugim rozwiązaniem jest umocnienie rytmu dnia i nocy poprzez stały schemat rytmu oświetlenia i dopasowanie pracy zmianowej do indywidualnego chronotypu pracownika. Mogłoby to jednak pogorszyć wydajność pracy. Brakuje uniwersalnych danych naukowych, na podstawie których można by sformułować ogólne wytyczne. Na obecną chwilę można stosować szkolenia dostosowane do potrzeb i wymagań odbiorców, jednak jest to trudne do realizacji. Dalsze badania, także badania terenowe, uwzględniające efekty chronobiologiczne są niezbędne dla rozwiązania kwestii problemów zdrowotnych wynikających z pracy zmianowej.

Cytowana literatura

1. Straif, K. B., R.; Grosse, Y.; Secretan, B.; El Ghissassi, F.; Bouvard, V.; Altieri, A.; Benbrahim-Tallaa, L.; Coglianò, V. (2007). Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting. *The Lancet Oncology* 8(12): 1065-1066.
2. DIN V 5031-100:2009-06: Optical radiation physics and illuminating engineering – Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings – Quantities, symbols and action spectra; German Institute for Standardization DIN, Berlin, 2009.
3. Gall, D., Bieske, K. (2004). Definition and measurement of circadian radiometric quantities, Paper presented at the *CIE Symposium '04: Light and Health: non-visual effects*, University of Performing Arts, Vienna.
4. Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bullough, J. D., Bierman, A. (2005). A model of phototransduction by the human circadian system, *Brain Res Brain Res Rev*, 50 (2), 213-228.
5. Riemersma-van der Lek, R. F., Swaab, D. F., Twisk, J., Hol, E. M., Hoogendijk, W. J., Van Someren, E. J. (2008). Effect of bright light and melatonin on cognitive and noncognitive function in elderly residents of group care facilities: a randomized controlled trial, *JAMA*, 299 (22), 2642-2655.
6. Viola, A.U., James, L.M., Schlangen, L.J.M., Dijk, D.J. (2008). Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality, *Scand J Work Environ Health*, 34, 297-306.