

Marek KUBALA, Tomasz ŚCIEŻOR*

OŚWIETLENIE GRUNTU PRZEZ ZANIECZYSZCZONE ŚWIETLNE NOCNE NIEBO

Oświetlenie gruntu przez zanieczyszczone świetlne nocne niebo, ze względu na zjawisko braku cienia, może bardziej zakłócać zachowania zwierząt aktywnych nocą niż światło Księżyca. Pomiar porównawcze oraz całoroczny monitoring jasności nocnego nieba wykazały, że w niektórych punktach wyspy świetlnej Krakowa prawie jedna czwarta nocy jest jaśniejsza niż podczas pełni Księżyca.

1. ZANIECZYSZCZENIE ŚWIETLNE NOCNEGO NIEBA

1.1. POJĘCIE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIETLNEGO

Pojęcie zanieczyszczenia świetlnego (ang.: *light pollution*) wprowadzono pierwotnie w latach 70. XX w. w naukach astronomicznych w celu opisanego zjawiska rozjaśnienia nocnego nieba pod wpływem rozpraszania w atmosferze światła pochodzenia ziemskiego, natomiast w naukach biologicznych na określenie szkodliwego wpływu sztucznego oświetlenia na organizmy żywe stosowany był zaproponowany w 1985 r. termin fotozanieczyszczenie (ang.: *photopollution*) [12].

Obecnie pojęcie zanieczyszczenia świetlnego przyswojone zostało również w naukach biologicznych i czasami wprowadza się z tego powodu rozróżnienie na astronomiczne i ekologiczne zanieczyszczenie świetlne.

Zanieczyszczenie świetlne jest więc dzisiaj rozumiane jako suma wszystkich niekorzystnych zjawisk związanych z wykorzystaniem przez człowieka sztucznego oświetlenia, wśród których wyróżnia się najczęściej takie zjawiska, jak: olśnienie (ang.: *glare*) – oddziaływanie na wzrok ludzi i zwierząt zbyt silnego bezpośredniego oświetlenia (oślepienie); zaświecanie (ang.: *trespass*) – naruszenie granic obszarów

* Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków.

sąsiednich do terenu oświetlanego (np. zaświecanie okien budynków mieszkalnych sąsiadujących z terenem oświetlanym czy zaświecanie pobliskich terenów chronionych) oraz poświatę niebieską (ang.: *sky glow*) – świecenie nocnego nieba poprzez rozpraszanie światła na składnikach atmosfery.

Ponieważ jednak poświatę niebieską rozumie się czasami jako sumę zjawisk składających się na świecenie nocnego nieba światłem rozproszonym (także naturalnych), więc czynnik sztuczny nazywany jest sztuczną poświatą niebieską (ang.: *artificial sky glow*) i to zjawisko możemy utożsamiać ze skutkami zanieczyszczenia świetlnego nocnego nieba.

1.2. ODDZIAŁYWANIE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIETLNEGO NOCNEGO NIEBA NA ORGANIZMY ŻYWE

W literaturze przedmiotu [3, 6, 7, 9, 11] prawie nie spotyka się publikacji dotyczących wpływu sztucznej poświaty niebieskiej na organizmy żywe. Związane jest to prawdopodobnie z faktem, że dominuje przekonanie o mniejszym wpływie sztucznej poświaty niebieskiej na zdrowie i zachowanie organizmów żywych, w porównaniu z innymi przejawami zanieczyszczenia świetlnego, co jest słuszne, gdy mamy do czynienia z oddziaływaniem tych drugich czynników. Jednakże badania wpływu światła księżycowego na zachowanie się zwierząt [1, 2, 4, 5] pozwalają przypuszczać, że w warunkach małego natężenia światła taki wpływ może być znaczny i niektóre doniesienia to potwierdzają [8].

Zagadnienie to jest o tyle istotne, że, w odróżnieniu od pozostałych czynników zanieczyszczenia świetlnego, wpływ sztucznej poświaty niebieskiej na ekosystemy jest najtrudniejszy do wyeliminowania, gdyż często światło rozproszone w atmosferze dociera z odległych źródeł. Dodatkowym niekorzystnym czynnikiem jest fakt, iż jest to światło emitowane przez całe niebo, nie dając wyraźnego cienia.

Celem badań było oszacowanie wpływu zanieczyszczenia świetlnego nocnego nieba na ekosystemy poprzez porównanie oświetlenia gruntu przez tak zanieczyszczone nocne niebo z oświetleniem przez światło Księżyca, zarówno ze względu na intensywność zjawiska, jak i ze względu na skalę czasową.

2. POMIARY

2.1. POMIARY JASNOŚCI NOCNEGO NIEBA

Pomiary jasności nocnego nieba, które w niniejszej pracy wykorzystano do analizy ilościowej, prowadzone były w ramach szerszego projektu, mającego za zadanie wyznaczenie granic wyspy świetlnej aglomeracji krakowskiej i określenie zależności

jasności nocnego nieba od czynników atmosferycznych [10].

Pomiary wykonywano miernikiem jasności nocnego nieba (SQM – Sky Quality Meter firmy Unihedron), wyskalowanym w astronomicznych jednostkach jasności powierzchniowej S_a – magnitudo na sekundę łuku do kwadratu ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$).

Ze względu na pochodzenie tej skali, jest ona skalą odwrotną i logarytmiczną, a jej związki z jednostkami układu SI (cd/m^2) wyraża się wzorem [10]:

$$[\text{cd}/\text{m}^2] = 108000 \cdot 10^{(-0,4 \cdot [\text{mag}/\text{arcsec}^2])} \quad (1)$$

Pomiary miernikiem SQM były prowadzone na dziesięciu stanowiskach w obrębie aglomeracji krakowskiej – sześciu w granicach miasta, dwu poza jego obrzeżami oraz dwu bardziej oddalonych. Na każdym stanowisku starano się wykonywać pomiary codziennie, w każdych warunkach pogodowych, około północy. Odnutowywany był czas pomiaru, ocena stopnia zachmurzenia i zamglenia oraz inne okoliczności mogące mieć wpływ na pomiar (np. faza i położenie Księżyca, stan pokrywy śnieżnej, rodzaj chmur itp.). Każdy pomiar składał się z serii przynajmniej pięciu odczytów, z których średnią zapisywano z dokładnością do 0,1 $\text{mag}/\text{arcsec}^2$.

Pomiar wykonywany był miernikiem skierowanym w stronę zenitu, w miejscu, gdzie sztuczne oświetlenie nie docierało bezpośrednio i gdzie obszar nieba, z którego zbierane było światło (w kącie do 20° od osi miernika), nie był przysłonięty żadnymi przeszkodami.

2.2. POMIARY OŚWIETLENIA GRUNTU PRZEZ ZANIECZYSZCZONE ŚWIETLNICZNOŚĆ NOCNE NIEBO

Pomiary oświetlenia gruntu przez zanieczyszczone świetlnie nocne niebo wykonano na terenach otwartych i nie zadrzewionych, tak aby możliwie duża część kopuły niebieskiej oświetlała teren. Do tego celu wybrano dwie lokalizacje w obrębie Krakowa – jedną na środku Błoni krakowskich, blisko centrum miasta, a drugą na otwartym terenie, na wschodnich obrzeżach miasta, pomiędzy osiedlem Rząka a wzgórzem Baranówka, na którym znajduje się fort Prokocim 50a.

Pomiary były prowadzone w warunkach pełnego zachmurzenia, przy pełnej pokrywie śnieżnej – na Błoniach pokrywa śnieżna była stara i podtopiona, w okolicach Rząki pokrywa była świeża. Kontrolnie wykonano również jeden pomiar na obszarze wiejskim, w warunkach częściowego zachmurzenia, bez pokrywy śnieżnej. Pomiary trwały od momentu zachodu słońca (początek zmierzchu cywilnego) do momentu początku nocy astronomicznej (koniec zmierzchu astronomicznego) i wykonywane były równoległe luksometrem (oświetlenie gruntu) oraz miernikiem SQM (jasność nieba). Użyty do pomiarów luksometr *Sonopan L-52* posiadał cztery zakresy czułości: 1–2000 lx, 0,1–200 lx, 0,01–20 lx i 0,001–2 lx.

2.3. POMIARY OŚWIETLENIA GRUNTU PRZEZ ŚWIATŁO KSIĘŻYCA

Pomiary oświetlenia gruntu światłem Księżycy były wykonywane luksometrem *Sonopan L-52*. Czujnik luksometru był umieszczony w pozycji poziomej, natomiast w celu wyeliminowania wpływu innych źródeł światła osłonięto go tubą skierowaną w stronę Księżycy.

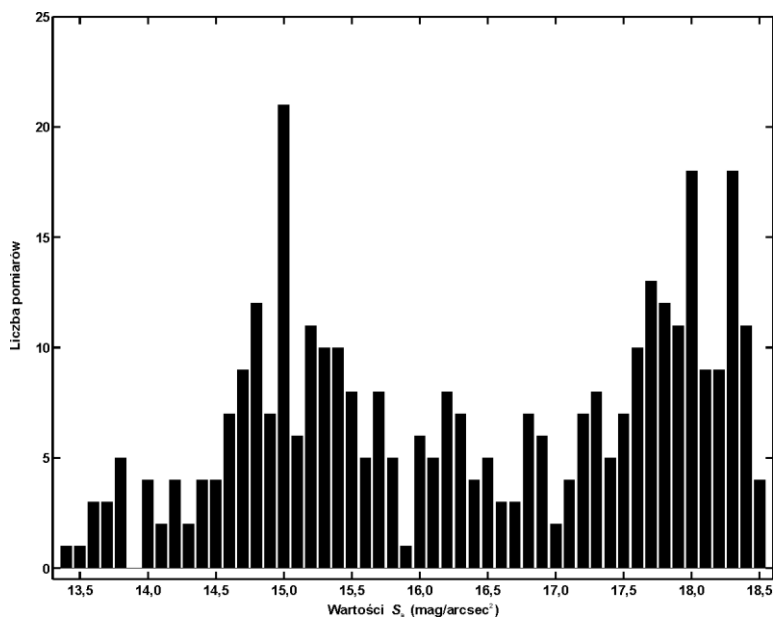
Pomiary wykonywano w pobliżu pełni Księżycy, gdyż w innych fazach, ze względu na jego położenie względem Słońca, Księżyc nie jest dominującym źródłem oświetlenia gruntu w nocy. Pomiary prowadzono w nocy z 11 na 12 września 2001 roku, gdy Księżyc był w fazie 99,6%, a w momencie górowania świecił $37,2^\circ$ nad horyzontem, oraz w kolejną noc, kiedy to Księżyc był w fazie 99,5% i górował $42,0^\circ$ nad horyzontem. Wybór pory roku przejściowej między latem i jesienią podyktowany był faktem, iż w miesiącach letnich Księżyc w okresie pełni góruje na niższych wysokościach nad horyzontem, poza tym w nocy niebo rozjaśnione jest światłem Słońca, znajdującego się na niewielkiej głębokości pod horyzontem, natomiast w miesiącach zimowych, kiedy Księżyc góruje w pełni na większych wysokościach, aktywność przyrody jest mniejsza.

3. WYNIKI

3.1. POMIARY JASNOŚCI NOCNEGO NIEBA

Pomiary jasności nocnego nieba przy pomocy mierników SQM trwały ponad rok – od połowy listopada 2008 r. do początku stycznia 2010 r. Na większości stanowisk liczba pomiarów przekraczała 300, a jedynie na dwóch nie przekroczyła 200. Najmniejsze wartości S_a (najjaśniejsze niebo) otrzymano w okresie zimowym przy pełnym zachmurzeniu w dzielnicach centralnych miasta – $13,4$ – $13,5$ mag/arcsec² ($0,43$ – $0,48$ cd/m²), na osiedlach peryferyjnych odpowiednie wartości wynosiły $13,6$ – $13,8$ mag/arcsec² ($0,33$ – $0,40$ cd/m²), na obrzeżach Krakowa – $14,4$ – $14,6$ mag/arcsec² ($0,16$ – $0,19$ cd/m²), a dalej poza Krakowem – $15,4$ – $15,5$ mag/arcsec² ($0,07$ – $0,08$ cd/m²). Odpowiednio kształtowały się też wartości maksymalne (niebo najciemniejsze): od $18,4$ mag/arcsec² ($0,005$ cd/m²) w centrum Krakowa, poprzez $19,3$ mag/arcsec² ($0,002$ cd/m²) na osiedlach peryferyjnych i $20,5$ mag/arcsec² ($0,0007$ cd/m²) na obrzeżach Krakowa, do $20,9$ mag/arcsec² ($0,0005$ cd/m²) w dalszych rejonach. Różnice pomiędzy wartościami maksymalnymi a minimalnymi wynosiły od 4,9 do 6,2 magnitudo, co oznacza odpowiednio 91 i 302-krotnemu zwiększeniu jasności.

W rozkładzie częstości otrzymanych wartości S_a wewnątrz Krakowa i na jego obrzeżach (rys. 1) można wyróżnić dwie dominanty: jedna odpowiada wartościom dla nieba zachmurzonego (wartości mniejsze S_a – niebo jaśniejsze), a druga wartościom nieba bezchmurnego (wartości większe S_a – niebo ciemniejsze). W niektórych dzielnicach (duże osiedla na peryferiach miasta) rozkład wartości ujawnia jeszcze jedną dominantę, dla wartości najmniejszych, co odpowiada warunkom zimowym – skrajnie niekorzystnym.



Rys. 1. Typowy rozkład wartości jasności nocnego nieba dla obszarów wewnątrz Krakowa

Generalnie można stwierdzić, że w obszarze Krakowa istnieje równowaga pomiędzy nocami „ciemnymi” a „jasnymi” – z lekką przewagą nocy „jasnych”. Jest to także słuszne dla w miarę ciemnych obrzeży miasta – tutaj ta równowaga jest zachowana, aczkolwiek zarówno noce ciemne, jak i jasne, są generalnie ciemniejsze niż wewnątrz miasta.

W miejscach oddalonych od Krakowa wyraźna jest przewaga nocy ciemnych, mimo że i tam rejestrowalny jest wpływ jego wyspy świetlnej. Może to oznaczać, że pozostałe czynniki, mające wpływ na jasność nieba, pochodzące z wyspy miejskiej, już tam nie docierają. Może to jednak być również efekt pozorny, gdyż na obu stanowiskach oddalonych wykonano mniej pomiarów, niż na większości stanowisk w mieście.

3.2. POMIARY OŚWIETLENIA GRUNTU PRZEZ ZANIECZYSZCZONE ŚWIETLNIENIE NOCNE NIEBO

Pomiary wykazały wykładniczą zależność oświetlenia gruntu, wyrażoną w lukсах, od jasności nieba wyrażonej w skali magnitudo, typu:

$$I = a \cdot \exp(-b \cdot S_a) \quad (2)$$

gdzie I – oświetlenie gruntu (lx), S_a – jasność powierzchniowa nieba (mag/arcsec²), natomiast a oraz b – współczynniki wyznaczone empirycznie.

Zważywszy na (1), odpowiada to liniowej zależności między jasnością nieba, wyrażoną w jednostkach SI, a oświetleniem gruntu.

We wszystkich trzech przypadkach dla górnych zakresów luksometru zależności te są podobne, natomiast dla najniższego zakresu, w przypadku pomiarów w mieście i na jego obrzeżach, zależności te różnią się od wyznaczonych dla górnych zakresów, jak i między sobą. Przyczyną tego mógł być wpływ źródeł światła otaczających przestrzenie otwarte, na których dokonywane były pomiary. Dowodem na to może być fakt, że w pomiarze kontrolnym na terenie wiejskim wartości dla zakresu dolnego wykazują taką samą zależność, jak dla zakresów górnych. Tak więc w dalszych rozważaniach, dla mniejszych wartości jasności nocnego nieba, przyjmujemy ekstrapolację zależności wyznaczonej dla górnych zakresów w obszarze miejskim oraz zależność wyznaczoną łącznie dla wszystkich zakresów dla pomiaru w obszarze wiejskim. W pierwszym przypadku wartości współczynników a oraz b wynoszą odpowiednio 274538 i 0,9355, natomiast w drugim przypadku 300366 i 0,9299.

3.3. POMIARY OŚWIETLENIA GRUNTU PRZEZ ŚWIATŁO KSIĘŻYCA

Pomiary oświetlenia gruntu światłem Księżyca wykazały słabą zmienność oświetlenia gruntu przez Księżyc podczas pełni. Od momentu zapadnięcia zupełnych ciemności (koniec astronomicznego zmierzchu) do momentu górowania Księżyca oświetlenie gruntu zmieniało się podczas obu nocy pomiarowych od wartości 0,080 lx do 0,143 lx, a jego zmienność była zgodna ze zmianami kąta padania promieni. Przez cały czas pomiaru w strefach oświetlonych wyraźnie można było rozpoznać przedmioty, a nawet odczytać cyfry na ciekłokrystalicznym wyświetlaczu luksometru.

3. WNIOSKI

Przyjmując jako średnie oświetlenie gruntu przez Księżyc w pełni wartość 0,14 lx, można było na podstawie zależności (2) i otrzymanych wartości parametrów a i b

wyznaczyć odnośne wartości jasności nocnego nieba, które powinny dawać podobne oświetlenie gruntu, co Księżyc w pełni. Wartości te dla dwu podanych poprzednio zestawów parametrów wynoszą odpowiednio 15,5 mag/arcsec² oraz 15,7 mag/arcsec².

Przyjmując bardziej optymistyczną wartość graniczną 15,5 mag/arcsec² można było stwierdzić, że w centrum Krakowa nocy dających oświetlenie gruntu 0,14 lx lub większe było w okresie pomiarowym 38% (134 noce), na dużych osiedlach 14–25% nocy, na osiedlach peryferyjnych i obrzeżach miasta ok. 10%, natomiast we wszystkich punktach odległych od miasta, ale jeszcze w granicach lub na obrzeżu jego wyspy świetlnej takich nocy było zaledwie 1 do 3.

Powyższe liczby pokazują, że w granicach miast zanieczyszczone światłnie nocne niebo jest poważnym czynnikiem wpływającym na ekosystemy chociażby parków miejskich. Bezpośredni wpływ na odległe obszary wydaje się być nieznaczny, ale brany był pod uwagę tylko jeden czynnik – oświetlenie gruntu – podczas gdy jasne tło nieba może również w inny sposób oddziaływać na organizmy żywe.

LITERATURA

- [1] BACHLEITNER W., KEMPINGER L., WÜLBERG C., RIEGER D., HELFRICH-FÖRSTER C., *Moonlight shifts the endogenous clock of Drosophila melanogaster*, PNAS, 2007, Vol. 104, No. 9, 3538–3543.
- [2] CLARKE J.A., *Moonlight's influence on predator/prey interactions between short-eared owls (Asio flammeus) and deermice (Peromyscus maniculatus)*, Behavioral Ecology and Sociobiology, 1983, Vol. 13, 205–209.
- [3] *Ecological consequences of artificial night lighting*, pod red. C. RICH, T. LONGCORE, Island Press, 2005.
- [4] GRIFFIN P.C., GRIFFIN S.C., WAROQUIERS C., SCOTT MILLS L., *Mortality by moonlight: predation risk and the snowshoe hare*, Behavioral Ecology, 2005, Vol. 16, 938–944.
- [5] JERLING H.L., WOOLDRIDGE T.H., *Lunar influence on distribution of a calanoid copepod in the water column of a shallow, temperate estuary*, Marine Biology, 1992, Vol. 112, 309–312.
- [6] KOHEI N., SCHREUDER D., *Light pollution handbook*, Springer, Dordrecht 2004.
- [7] LONGCORE T., RICH C., *Ecological light pollution*, Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, Vol. 2, No. 4, 191–198.
- [8] MOORE M.V., PIERCE S.M., WALSH H.M., KVALVIK S.K., LIM J.D., *Urban light pollution alters the diel vertical migration of Daphnia*, Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie, 2000, Vol. 27, 1–4.
- [9] NAVARA K.J., NELSON R.J., *The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences*, Journal of Pineal Research, 1976, Vol. 43, No. 3, 349–352.
- [10] ŚCIEŻOR T., KUBALA M., KASZOWSKI W., DWORAK T. Z. *Zanieczyszczenie światłnie nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [11] TEIKARI P., *Light pollution: Definition, legislation, measurement, modeling and environmental effects*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona 2007, 40–54.
- [12] VERHEIJEN F.J., *Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with. Incidents, causation, remedies*, Experimental Biology, 1985, Vol. 44, No. 1, 1–18.

GROUND ILLUMINATION BY THE LIGHT POLLUTED NIGHT SKY

The lighting of the ground by the light polluted night sky due to the phenomenon of the lack of shade may interfere more with the animal behavior than the light of the Moon. Comparative measurements and year-round monitoring of the brightness of the night sky have shown that at certain points of the light island of Krakow nearly a quarter of nights are brighter than during the full moon period.