

TOMASZ ŚCIEŻOR

Wydział Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: sciezor@vistula.wis.pk.edu.pl

**PROPAGACJA SZTUCZNEGO OŚWIETLENIA NAZIEMNEGO
W ATMOSFERZE**

W pracy przedyskutowano zagadnienie propagacji światła pochodzącego ze źródeł naziemnych. Światło to oddziałuje na otoczenie zarówno w sposób bezpośredni, jak również w sposób pośredni, poprzez rozproszenie na aerozolu atmosferycznych wywołując efekt tzw. sztucznej poświaty niebieskiej. Oddziaływanie takie jest istotne zwłaszcza w przypadku obszarów chronionych znajdujących się w pobliżu skupisk ludzkich będących silnymi źródłami zanieczyszczenia świetlnego. Ekstynkcja światła w atmosferze, jak również często ukształtowanie terenu czy roślinność sprawia, że już w odległości kilku kilometrów jego bezpośredni wpływ na otoczenie jest znikomy. W przypadku sztucznej poświaty niebieskiej sytuacja jest bardziej złożona. Przeprowadzona analiza zebranych w ciągu kilku lat danych pomiarowych pozwoliła stwierdzić, że sztuczna poświata niebieska jest istotna ekologicznie wyłącznie w przypadku nieba zachmurzonego, przy czym istotna jest tutaj podstawa chmur. Wydaje się jednak, że przy niskiej podstawie chmur efekt rozjaśnienia nieba jest praktycznie ograniczony do części sfery niebieskiej położonej bezpośrednio nad źródłem światła, bardzo szybko zanikając wraz z rosnącą odległością. W przypadku nieba bezchmurnego bądź też w obecności jedynie chmur wysokich, obszar rozjaśnionego nieba powiększa się, jednak spada znacząco udział zanieczyszczenia świetlnego w jego jasności powierzchniowej. Oznacza to, że o ile efekt ten ma znaczenie w prowadzeniu obserwacji astronomicznych, o tyle ma on raczej znikomy wpływ ekologiczny. Przeprowadzone badania wskazują na konieczność ochrony bezpośrednich okolic obszarów chronionych przede wszystkim przed wadliwie skonstruowanym oświetleniem naziemnym, pokazując jednocześnie, że możliwe jest zachowanie ekologicznie ciemnego nieba nawet w pobliżu dużych ośrodków miejskich. Jednocześnie potwierdzają one konieczność lokalizacji obserwatoriów astronomicznych z dala od jakichkolwiek skupisk ludzkich.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie świetlne, sztuczna poświata niebieska, jasność nieba, natężenie oświetlenia, wyspa świetlna

I. WSTĘP

Sztuczne oświetlenie nocne oddziałuje na otoczenie w różny sposób, zarówno bezpośrednio, jak też pośrednio poprzez tzw. sztuczną poświatę niebieską. Oświetlenie to pochodzi przede wszystkim z nieprawidłowo skonstruowanych opraw lamp ulicznych, jak

również z nieprzesłoniętych w żaden sposób okien mieszkań, a zwłaszcza pomieszczeń biurowych. Zanieczyszczenie świetlne rozpatruje się najczęściej poprzez jego wpływ na jakość obserwacji astronomicznych [Joseph i in. 1991], gdzie zwraca się uwagę na sztuczną poświatę niebieską. Ten rodzaj zanieczyszczenia świetlnego określa się jako astronomiczne zanieczyszczenie świetlne [Schreuder 2001]. Jednocześnie, w przypadku wpływu zanieczyszczenia świetlnego na środowisko naturalne (tzw. ekologiczne zanieczyszczenie świetlne), najczęściej rozważa się wpływ bezpośredniego oświetlenia nocnego na organizmy żywe [Ecological Consequences 2006].

W niniejszej pracy podjęto próbę weryfikacji prawdziwości powyższych założeń na podstawie przeprowadzonych badań własnych.

II. METODA PRACY

Pomiarów jasności nieba wykonywano za pomocą mierników jakości nocnego nieba – Sky Quality Meter (SQM) zarówno w wersji przenośnej (SQM-L), jak i stacjonarnej (SQM-LE). Mierniki te posiadają kąt zbierania światła do 20° od osi przyrządu, co pozwala na badanie rozkładu jasności powierzchniowej sfery niebieskiej, oznaczanej jako S_a .

Przy pomocy mierników SQM-L wykonano szereg pomiarów objazdowych, obejmujących zarówno obszary zamieszkane, jak również chronione, uważane za wolne od zanieczyszczenia świetlnego. Głównym celem tych pomiarów było wyznaczenie zasięgu obszarów, w którym jasność sztucznej poświaty niebieskiej przekracza jasność poświaty naturalnej. Obszary te nazwano „wyspami świetlnymi” [Kubala i in. 2009]. Mierniki SQM-LE umieszczone zostały w Obserwatorium Astronomicznym na górze Suhora w Gorcach oraz w punkcie poboru wody na Zbiorniku Dobczyckim. Mierniki te dokonują ciągłego pomiaru jasności powierzchniowej nocnego nieba w zenicie w odstępie 10 minutowym. W przypadku obserwatorium na Suhorze umieszczona obok kamera typu All-Sky co minutę wykonuje zdjęcie całego nieba, co umożliwia interpretację danych otrzymanych z miernika SQM-LE [<http://www.as.up.krakow.pl/main/snieg.php?lang=pl>]. W analizie wykorzystano również podobne dane pochodzące z trzech analogicznych mierników SQM-LE, umieszczonych w Bieszczadach (Stuposiany, Lutowiska, Połonina Wetlińska). Niestety, praktyczny brak równoległe wykonywanych zdjęć nieba dla całego okresu badawczego utrudnia pełne wykorzystanie tych danych.

Zmierzona przez mierniki SQM wartość podawana jest w astronomicznych jednostkach jasności powierzchniowej: magnitudo na sekundę łuku do kwadratu ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$)². Jednostką luminancji w układzie SI jest kandela na metr kwadratowy (cd/m^2) oraz, w przypadku niskiej jasności powierzchniowej, jednostka pochodna milikandela na metr kwadratowy (mcd/m^2). W niniejszej pracy stosowana jest skala [$\text{mag}/\text{arcsec}^2$], przy jednoczesnym podaniu odpowiednich wartości w skali [mcd/m^2].

Do pomiarów natężenia oświetlenia od różnych źródeł światła wykorzystywany był luksometr wysokiej czułości Sonopan L-52. Pomiaru przy pomocy luksometru wykonywane były w Krakowie, zarówno w centrum, jak również na peryferiach. W celu określenia natężenia oświetlenia od wybranych źródeł światła wykonano osłonę ograniczającą pole widzenia luksometru do koła o średnicy kątowej 20° .

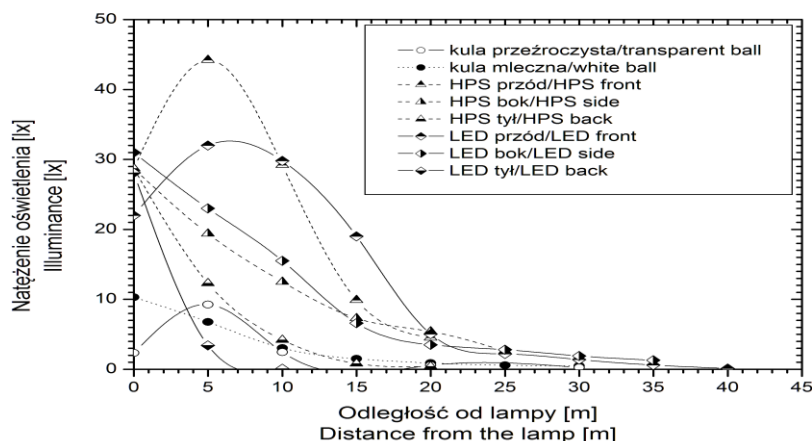
Do analiz wykorzystano również szereg nocnych zdjęć łun świetlnych wybranych miejscowości, jak również większych obszarów Małopolski, wykonanych zarówno przy niebie bezchmurnym, jak również zachmurzonym.

² Skala $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ jest skalą logarytmiczną i odwrotną, czyli rosnąca wartość liczbową oznacza malejącą jasność obiektu, w tym przypadku nieba.

III. WYNIKI BADAŃ

3.1. Oświetlenie bezpośrednie przez widoczne źródła światła

Przeprowadzono pomiary natężenia oświetlenia w zależności od odległości od wybranych źródeł światła, w szczególności od typowych ozdobnych lamp osiedlowych typu „świecące kule” oraz różnego rodzaju lamp ulicznych z oprawami ograniczającymi emisję światła do wybranego kierunku (ryc. 1).



Ryc. 1. Natężenie oświetlenia w funkcji odległości od kilku typów lamp miejskich

Fig. 1. Illuminance vs. distance from several types of city lamps

W przypadku lamp osiedlowych zmierzono natężenie oświetlenia od lamp z ozdobnymi kulistymi kloszami przezroczystymi, jak również z kulistymi kloszami mlecznymi. W każdym z badanych przypadków natężenie oświetlenia w pobliżu lampy wynosiło od 6 lx do 10 lx, szybko malejąc do zaledwie 0,3-0,5 lx w odległości 30 m. W przypadku lampy oświetlającej ulicę wewnątrzosiedlową, z oprawą ograniczającą boczną emisję światła, natężenie oświetlenia pod lampą bezpośrednio wyniosło 40 lx, w odległości 20 m przed lampą spadając do zaledwie 0,4 lx.

Wśród badanych lamp ulicznych zmierzono natężenie oświetlenia zarówno dla tradycyjnych wysokoprężnych lamp sodowych (HPS) jak również nowoczesnych lamp ledowych (LED). W przypadku lamp HPS maksymalne natężenie oświetlenia, równe 45 lx, zmierzono na wprost lampy, w odległości 5 m, na środku oświetlanej ulicy. W tym samym kierunku, w odległości 20 m wynosiło ono już tylko ok. 5 lx. Podobne wartości zmierzono wzdłuż ulicy, co oznacza, że przy odległości między lampami równej 30 m, oświetlają one w miarę równomiernie ulicę, co zresztą było z pewnością zakładane przy ich montażu. Jednocześnie natężenie światła „wstecznego”, zmierzone w kierunku przeciwnym do ulicy, maleje do wartości poniżej 1 lx w odległości już 15 m.

Podobne wartości otrzymano dla lamp LED: odpowiednio ok. 33 lx na środku ulicy i 4 lx w odległości 20 m wzdłuż ulicy. Należy jednak zwrócić uwagę, że w tym przypadku oświetlenie „wsteczne” już w odległości 10 m ma natężenie jedynie 0,1 lx. Oznacza to, że lampy LED najlepiej realizują założoną funkcję oświetlenia ulicy, jednocześnie najmniej zanieczyszczając światłem otoczenie.

Analizując opisane wyżej przypadki należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że w każdym z nich natężenie oświetlenia szybko malało z odległością, już w odległości 20 m wynosząc 1-5 lx, a w odległości 50 m zaledwie 0,1 lx, co jest wartością niższą od natężenia oświetlenia przez Księżyc w pełni [Kubala i Ścieżor 2012]. Należy dodatkowo zwrócić

uwagę na to, że opisywane źródła światła w odległości 50 m widoczne są na wysokości zaledwie 5° nad horyzontem, kryjąc się często za roślinnością czy nierównościami terenu.

Zbadano również natężenie światła pochodzącego od izolowanego osiedla mieszkaniowego (os. Ruczaj w Krakowie). Stwierdzono, że z odległości 2 km daje ono oświetlenie o natężeniu zaledwie 0,2 lx, co odpowiada oświetleniu przez Księżyc w pełni, jednak w tym przypadku źródło światła (czyli całe osiedle) wznosi się jedynie 1° nad horyzontem. Pomiary światła pochodzącego od innego rodzaju pojedynczych źródeł wykazały, że dom jednorodzinny w odl. 60 m daje oświetlenie 0,06 lx, pojedyncze świecące okno w odl. 20 m – 0,08 lx, galeria handlowa w odl. 2 km – 0,018 lx.

Otrzymane wyniki oznaczają, że pojedyncze bezpośrednie źródła światła, bądź nawet ich skupisko, mają znikome znaczenie zarówno astronomiczne, a nawet ekologiczne w przypadku organizmów naziemnych. Należy jednak zwrócić uwagę na opisany w literaturze przedmiotu wpływ ekologiczny tego typu zanieczyszczenia świetlnego na latające zwierzęta nocne kierujące się światłem (owady, ptaki nocne, nietoperze) [Ecological consequences 2006].

3.2. Oświetlenie przez światło rozproszone w atmosferze

Duża część światła pochodzące ze źródeł naziemnych kieruje się w niebo gdzie, rozpraszając się na różnego rodzaju aerozoluach atmosferycznych, powoduje sztucznie świecenie nocnego nieba, tzw. sztuczną poświatę niebieską [Davies i in. 2013]. Efekt ten jest szczególnie wyraźnie widoczny w miastach, które z natury są silnymi źródłami zanieczyszczenia świetlnego, tworząc tzw. „wyspy świetlne”, zwane też popularnie „lunami miejskimi” (choć oczywiście tego typu obiekt powstaje nad każdym, nawet pojedynczym, źródłem światła), które są sumą oświetlenia nieba przez wszystkie naziemne wadliwie skonstruowane źródła światła jak również światła pochodzącego od prawidłowo skonstruowanych źródeł, odbitego od powierzchni ziemi (efekt ten istotny jest zwłaszcza zimą, w obecności pokrywy śnieżnej) [Cinzano i Falchi 2012].

Bardzo często w tego typu analizach rozróżnia się wpływ na otoczenie łuny świetlnej (tzw. „sztucznej poświaty niebieskiej”) powstającej w warunkach nieba bezchmurnego (tzw. „astronomiczne zanieczyszczenie świetlne”) od światła rozpraszającego się na chmurach (zaliczane do tzw. „ekologicznego zanieczyszczenia świetlnego”) [Longcore i Rich 2004]. Rozróżnienie to wynika ze sposobu oddziaływania na otoczenie – rozjaśnienie nieba bezchmurnego ma znikome znaczenie ekologiczne przy silnym znaczeniu astronomicznym, natomiast rozjaśnienie nieba zachmurzonego nie ma znaczenia astronomicznego, silnie jednak wpływając na lokalne ekosystemy [Ścieżor i Kubala 2011].

3.2.1. Wyspy świetlne

3.2.1.1. Struktura pionowa wysp świetlnych

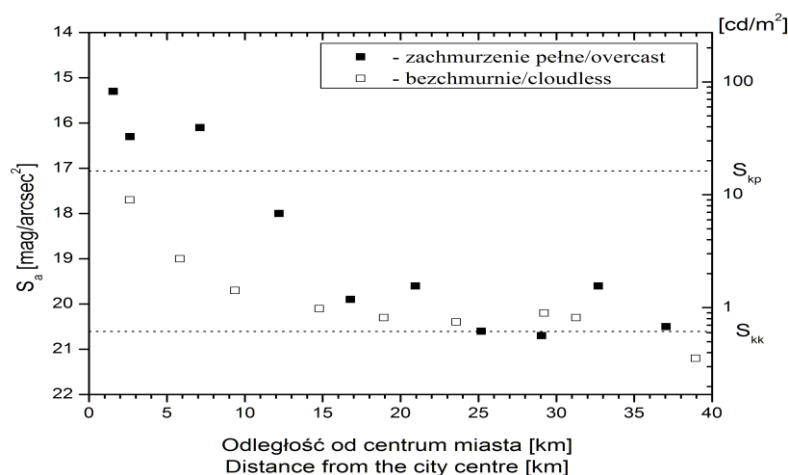
Analiza zdjęć panoramicznych, wykonanych w bezchmurne noce z odległości kilkunastu bądź kilkudziesięciu kilometrów od badanych ośrodków miejskich wykazała, że lunę światła widoczną nad miastem można podzielić na dwie, wyraźnie rozgraniczone warstwy: niższą, w obrębie której jasność powierzchniowa jest praktycznie stała, oraz wyższą, w której jasność powierzchniowa wyraźnie maleje z wysokością aż do zlania się z tłem nieba. W przypadku Krakowa (ludność: 760 tys., gęstość zaludnienia: 2300 os./km²) wysokość warstwy niższej wynosi 1,7-2,0 km, natomiast warstwa wyższa zanika na wysokości 5-8 km nad powierzchnią ziemi. W przypadku Kalwarii Zebrzydowskiej (ludność: 4500, gęstość zaludnienia: 780 os./km²) warstwa niższa osiąga pułap 0,3 km, natomiast warstwa wyższa 3-6 km, w przypadku Nowego Sącza (ludność: 84 tys., gęstość zaludnienia: 1500 os./km²) są to odpowiednio

wysokości 2 km i 5 km. Na podstawie tych samych zdjęć podjęto próbę określenia kąta rozpraszania łuny miejskiej w atmosferze (tzw. „stożka świetlnego”). Wydaje się, że można go oszacować na ok. 60° od kierunku zenitalnego. W przypadku izolowanych źródeł światła, otoczonych przez obszary nie oświetlone (np. stok narciarski) nie stwierdzono występowania warstwowej struktury łuny świetlnej, która w tym przypadku, powoli zanikając, sięga do pułapu ok. 700 m.

3.2.1.2. Profil wysp świetlnych

Określono poziomy zasięg wysp świetlnych wybranych miejscowości Polski południowej: Krakowa, Myślenic, Dobczyc, Żywca, Bielska-Białej i Zakopanego [Ścieżor i in. 2010]. Wyspę świetlną zdefiniowano jako obszar otaczający daną miejscowość, w którym jasność powierzchniowa nocnego nieba jest wyższa od jasności powierzchniowej nocnego nieba określonej dla terenów otaczających. Należy zauważyć, że tak wyznaczona wyspa świetlna dla Krakowa pokrywa się z dużą dokładnością z obszarem zaświecenia nieba, widocznym na modelowej mapie zanieczyszczenia świetlnego Europy [Cinzano i in. 2001b]. W każdym przypadku pomiary wykonywane były w trakcie wyjazdów terenowych, w odstępach co ok. 5 km, w warunkach „jednorodnego nieba”, tzn. zarówno przy niebie całkowicie bezchmurnym, jak również przy całkowicie zachmurzonym, co miało na celu uniknięcie efektów związanych z niejednorodnością zachmurzenia.

Stwierdzono, że w przypadku Krakowa w kierunku północnym (najlepiej zbadanym) wyspa świetlna sięga do odległości 25 km od centrum miasta i, co ważniejsze, odległość ta nie zależy od zachmurzenia. Wyraźnie jest jednak widoczne, że wraz z oddalaniem się od centrum miasta jasność nieba maleje znacznie szybciej w przypadku nieba zachmurzonego (od 15,0 do 20,4 mag/arcsec², co oznacza stukrotny liniowy spadek jasności) niż w przypadku nieba bezchmurnego (od 17,5 do 20,4 mag/arcsec², co oznacza dziesięciokrotny liniowy spadek jasności). Oznacza to, że zachmurzone niebo znacznie efektywniej odbija intensywne światło naziemne, niż niebo bezchmurne. Co więcej, wydaje się, że w tym przypadku znaczniejszy udział odgrywa światło pochodzące z satelitarnych miejscowości, okrążających Kraków (ryc. 2).



Ryc. 2. Profil wyspy świetlnej Krakowa w kierunku północnym dla nieba całkowicie zachmurzonego i bezchmurnego

Fig. 2. Profile of the Cracow light-island to the north for overcast and cloudless sky

W celu określenia potencjalnego znaczenia ekologicznego tego zjawiska, na wykresie zaznaczono jasność nieba, które daje oświetlenie gruntu równe oświetleniu przez Księżyc w kwadrze (S_{kk}) oraz przez Księżyc w pełni (S_{kp}), przy teoretycznym założeniu, że to naturalne źródło światła znajduje się w zenicie. Oznacza to, że zakres od S_{kp} do S_{kk} odpowiada „nocom księżycowym”. Wpływ Księżyca na lokalne ekosystemy jest szeroko zbadany [Gliwicz 1986], a należy pamiętać, że zanieczyszczone świetlnie nocne niebo, w przeciwieństwie do Księżyca, nie zachodzi i nie daje cienia. Z prezentowanego wykresu i wcześniej opisanego statystyki dni zachmurzonych wynika, że w Krakowie i okolicy w ciągu roku dominują „sztuczne noce księżycowe”, a w samym mieście nawet jaśniejsze [Kubala i Ścieżor 2012].

W przypadku mniejszych miejscowości, takich jak Dobczyce i Myślenice, zasięg wysp świetlnych wynosi odpowiednio 3 km i 4 km i również nie zależy od zachmurzenia. W tych przypadkach jednak również profil wyspy świetlnej nie zależy od zachmurzenia – brak jest dodatkowego wzmocnienia jasności nieba zachmurzonego w pobliżu centrów tych miejscowości. Może to oznaczać, że efekt ten występuje jedynie w przypadku dużych miast, takich jak Kraków, otoczonych osiedlami mieszkaniowymi i miejscowościami satelitarnymi. Efektu wzmocnienia nie zaobserwowano również w przypadku Żywca. W tym przypadku jednak zaobserwowano zmianę zasięgu wyspy świetlnej – przy bezchmurnym niebie sięga ona w kierunku północnym jedynie 2 km od centrum miasta, natomiast przy niebie w pełni zachmurzonym zasięg ten zwiększa się do 4 km, co może mieć związek ze specyfiką rozkładu zasiedlenia Kotliny Żywieckiej.

3.2.2. Chmury jako źródło silnego zanieczyszczenia świetlnego

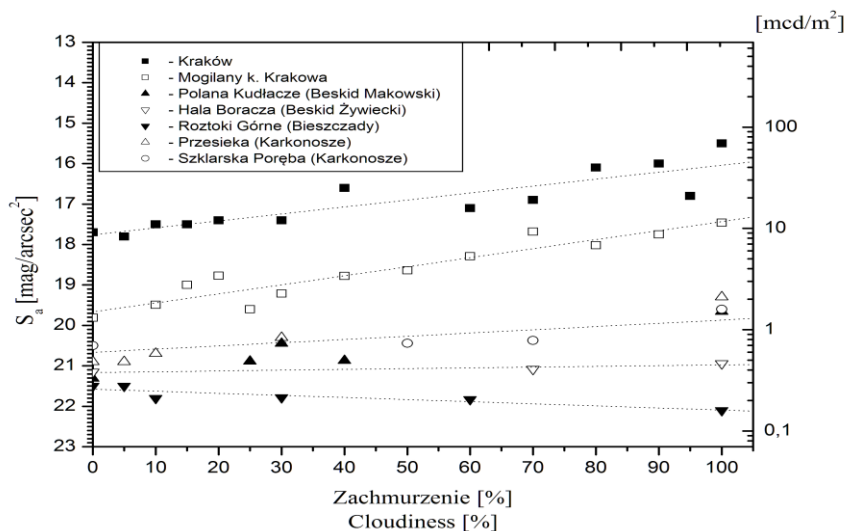
Już dawno zauważono, że chmury bardzo efektywnie odbijają światła naziemne [Kyba i in. 2011]. Przeprowadzone pomiary wykazały, że przy pełnym zachmurzeniu chmurami niskimi w centrum Krakowa oświetlenie powierzchni ziemi może przekroczyć 0,14 lx, co odpowiada oświetleniu przez Księżyc w pełni [Kubala i Ścieżor 2012]. Jak wiadomo, tego rodzaju sztuczna poświata niebieska ma silny wpływ na lokalne ekosystemy [Longcore i Rich 2004], w związku z czym konieczne jest zbadanie nie tylko jakościowe, lecz również ilościowe wpływu chmur na jej wielkość. Jest to o tyle istotne, że na całym obszarze Polski niebo przez ponad 140 dni w ciągu roku jest całkowicie lub prawie całkowicie zachmurzone (zachmurzenie ≥ 7 oktantów), a w niektórych regionach (Pomorze Środkowe, okolice Wrocławia) liczba ta przekracza nawet 180 dni [Atlas klimatu 2005].

3.2.2.1. Wpływ stopnia zachmurzenia na zasięg i profil wysp świetlnych.

Począwszy od 2010 r., w ramach prowadzonych pomiarów jasności nocnego nieba, równoległe odnotowywano również poziom zachmurzenia, oceniany wizualnie jako procentowe zachmurzenie występujące w polu widzenia miernika SQM-L skierowanego w zenit. Pomiary wykonywane były zarówno w dużych miastach (Kraków, Lublin, Wrocław), jak również w mniejszych miejscowościach oraz na obszarach ekologicznie czystych (Beskid Żywiecki, Bieszczady, Sudety).

Na wykresie zależności S_a od oszacowanej wielkości zachmurzenia (wartości S_a zostały uśrednione dla kolejnych wartości procentowych zachmurzenia) we wszystkich opisanych punktach pomiarowych widoczna jest wyraźna, zapewne liniowa, zależność (ryc. 3). Najczęściej współczynnik kierunkowy tej zależności jest dodatni, co oznacza wzrost jasności nocnego nieba ze wzrostem zachmurzenia. Jest to niewątpliwie związane z obecnością lokalnych naziemnych źródeł światła. W przypadku terenów częściowo (Hala Boracza w Beskidzie Żywieckim) bądź prawie całkowicie izolowanych (Roztoki Górne w Bieszczadach)

współczynnik ten jest w przybliżeniu równy zeru (Hala Boracza) lub nawet osiąga wartości ujemne (Roztoki Górne w Bieszczadach).



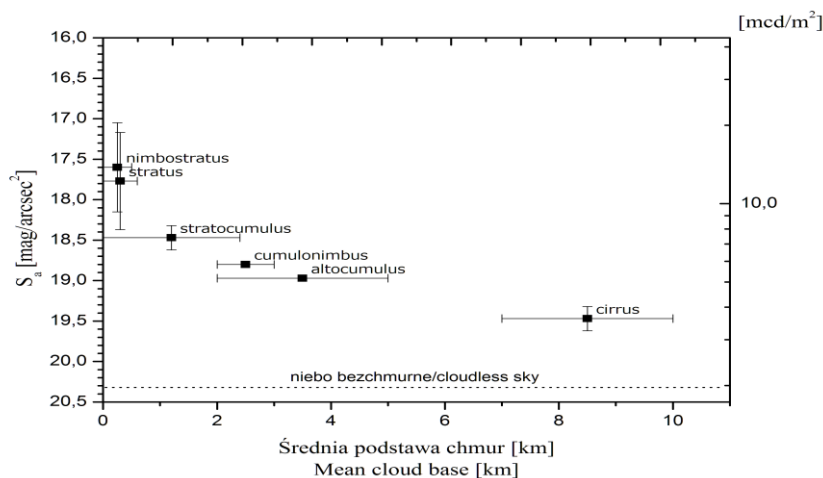
Ryc. 3. Zależność jasności powierzchniowej nocnego nieba od zachmurzenia w różnych otoczeniach
Fig. 3. Night sky surface brightness vs. cloudiness in various environments

Wstępna analiza danych otrzymanych na bieszczadzkich stacjach monitoringu (Lutowiska, Stuposiany, Połonina Wetlińska), prowadzi do wniosku, że wartość współczynnika kierunkowego bardzo silnie zależy od obecności lokalnych źródeł światła. Postawiona kiedyś teza, że wartość tego współczynnika informuje o wielkości zanieczyszczenia świetlnego w danym otoczeniu [Ściężor i in. 2010] jest słuszna pod warunkiem przeprowadzania pomiarów z dala od jakichkolwiek lokalnych źródeł światła. Zarówno w przypadku Hali Boraczej jak i Roztok Górnych w pobliżu punktów pomiarowych brak jest lokalnych źródeł światła, tak więc wyniki należy uznać za wiarygodne. W przypadku stanowisk bieszczadzkich, punkty pomiarowe Lutowiska i Stuposiany znajdują się w obrębie niewielkich miejscowości (Lutowiska – 2200 mieszkańców, Stuposiany – 337 mieszkańców), natomiast Połonina Wetlińska znajduje się w pobliżu znanego lotniska Wetlina, będącego silnym źródłem zanieczyszczenia świetlnego, co więcej, jest nim często również schronisko Chatka Puchatka, przy którym znajduje się miernik. Zapewne to jest przyczyną, że na tych stanowiskach stwierdzono dodatnią charakterystykę zależności jasności nieba od zachmurzenia.

3.2.2.2. Wpływ rodzaju chmur na poziom zanieczyszczenia świetlnego

Od 2014 r. w Zabierzowie pod Krakowem wykonywane są pomiary jasności nocnego nieba wraz z określeniem rodzaju chmur. Stwierdzono, że w przypadku chmur niskich typu *Stratocumulus*, *Nimbostratus* oraz *Stratus*, pokrywających całe niebo, jasność nocnego nieba jest największa i zależy wyłącznie od podstawy chmur. Analiza pomiarów wykonanych w obserwatorium na Suhorze przy pomocy miernika SQM-LE oraz równoległych zdjęć nieba wykazała, że w przypadku tego rodzaju chmur światła okolicznych miejscowości, oddalonych o 4-6 km, nie wpływają na jasność nieba w zenicie, rozjaśniając jedynie horyzont. W przypadku chmur wyższych, typu *Cumulonimbus*,

*Alto*cumulus i *Cirrus*, oprócz wyraźnej zależności od podstawy tych chmur (ryc. 4), stwierdzono też zależność od stopnia zachmurzenia. Dla obserwatorium na Suhorze chmury te wyraźnie rozjaśniają niebo nawet w zenicie.



Ryc. 4. Zależność jasności powierzchniowej całkowitego zachmurzonego nocnego nieba od rodzaju chmur i średniej podstawy chmur w Zabierzów

Fig. 4. Overcast night sky surface brightness vs. type of clouds and mean cloud base in Zabierzów

IV. DYSKUSJA

4.1. Modelowe mapy zanieczyszczenia świetlnego a rzeczywistość

Powszechnie znane i interpretowane są mapy rozkładu jasności sztucznej poświaty niebieskiej, nazywanej często po prostu zanieczyszczeniem świetlnym [Cinzano i in. 2001b, Bruehlman 2014]. Zapomina się jednak o tym, że są to jedynie modele dotyczące nieba bezchmurnego [Cinzano i in. 2001b], ponadto posiadające niską terenową rozdzielczość przestrzenną. Często ostatnio wykorzystywane do analiz zanieczyszczenia świetlnego satelitarne zdjęcia VIIRS w rzeczywistości pokazują jedynie światło emitowane przez źródła naziemne w górę [Seaman 2013]. Natężenie tego światła jest oczywiście skorelowane z natężeniem oświetlenia powierzchni ziemi przez sztuczną poświatę niebieską, jednak korelacja ta nie jest stała i zależy od wielu czynników, takich jak zawartość aerozoli w atmosferze czy ukształtowanie terenu [Cinzano i in. 2001a]. Oznacza to, że mapy VIIRS nie mogą być traktowane jako mapy zanieczyszczenia świetlnego, lecz jedynie informują o natężeniu oświetlenia w danym obszarze. Dowodem na to są analizy zmian jasności nieba przeprowadzone na podstawie obserwacji komet w Polsce w latach 1994-2009 [Ściężor 2013], jak również bezpośrednie pomiary wykonywane w wielu punktach Polski przy pomocy mierników SQM [<http://www.lightpollutionmap.info/>]. Dowiodły one, że nawet w obszarach, gdzie model [Cinzano i in. 2001b] czy zdjęcia VIIRS wskazują na potencjalnie dużą jasność powierzchniową nocnego nieba, można znaleźć miejsca znacznie ciemniejsze od przewidywań. W przypadku modelu jest to zapewne związane głównie z jego małą skalą przestrzenną oraz nie uwzględnianiem ukształtowania terenu i struktury subtelnej wysp świetlnych.

Aby sprawdzić powyższą tezę, w 2016 r. przy pomocy miernika SQM-L wykonano pomiary weryfikacyjne jasności nocnego nieba w wielu punktach pomiarowych w Jerzmanowicach oraz Zabierzowie pod Krakowem oraz porównano wyniki z dostępnymi mapami modelowymi zanieczyszczenia świetlnego oraz zdjęciami VIIRS tych obszarów. Stwierdzono, że w obu przypadkach niebo jest wyraźnie ciemniejsze, niż przewiduje to mapa modelowa. Z kolei, w pobliżu lokalnych źródeł światła zmierzona jasność nocnego nieba jest wyraźnie wyższa, niż przewidują wspomniane modele i zdjęcia.

4.2. Wpływ rodzaju i podstawy chmur na poziom sztucznej poświaty niebieskiej

Wydaje się, że dominującą rolę w rozpraszaniu światła naziemnych, odgrywają niskie chmury typu *Stratocumulus*, *Nimbostratus* oraz *Stratus* [Ścieżor i Kubala 2012]. Podstawa tych chmur jest zawsze niższa od 2 km, przez co w całości znajdują się one w opisanym wcześniej obszarze strefy mieszania [Walczewski 1994; Kaszowski i in. 2012]. W obszarze tym światło rozprasza się na przyziemnych aerozolach atmosferycznych [Ścieżor i Kubala 2014]. Analiza panoramicznych zdjęć nocnych obszaru Małopolski pozwala postawić tezę, że stożek rozproszenia światła skierowanego w niebo w tej warstwie ma zapewne stały kąt rozwarcia od pionu równy około 60° .

W przypadku chmur wysokich (np. typu *Cirrus*), ich wpływ na jasność nocnego nieba jest stosunkowo nieduży i daje się zauważyć jedynie w przypadku największych ośrodków miejskich (Kraków, Wrocław, Warszawa). Już w przypadku Lublina (340 tys. mieszkańców) rozjaśnienie nocnego nieba przez tego rodzaju chmury jest znikome.

Szczegółowe pomiary jasności nocnego nieba, zachmurzonego chmurami wysokimi, w obserwatorium na Suhorze, w powiązaniu z analizą równoległe wykonywanych zdjęć nocnego nieba pozwalają na oszacowanie kąta rozwarcia od pionu stożka rozproszenia światła pochodzącego z okolicznych miejscowości na mieszczący się w przedziale od 60° do 70° . Jak widać, jest to wartość zbliżona do kąta propagacji wyznaczonego dla chmur niskich na podstawie zdjęć panoramicznych. Założenie, że jest to wartość prawdziwa dla każdej miejscowości pozwala w przypadku Krakowa wyznaczyć zasięg zaświecenia nieba przez miasto w zenicie na ok. 30 km od jego centrum, co jest zgodne z opisanymi wcześniej pomiarami zasięgu „wyspy świetlnej” Krakowa [Kubala i in. 2009].

Podobne wartości kąta propagacji światła ze źródeł naziemnych zostało zasygnalizowane w przypadku Berlina i Wiednia, gdzie pomiary wykonywane były przy pomocy zdalnie sterowanego balonu [Kyba i in. 2012].

O decydującym wpływie lokalnych źródeł światła na jasność nocnego nieba świadczy również analiza pomiarów przeprowadzonych w czasie awarii zasilania miejskiego w Krakowie w dniu 25 sierpnia 2015 r. [Ścieżor i Kubala 2012]. W tym dniu, tuż po awarii, przy praktycznie bezchmurnym niebie zmierzono jasność powierzchniową $S_a = 17,51 \text{ mag/arcsec}^2$ ($10,79 \text{ mcd/m}^2$). W czasie awarii, obejmującej całe osiedle Podwawelskie i sąsiednią dzielnicę Dębniki w promieniu 1500 m od miejsca pomiaru, zmierzono $S_a = 18,07 \text{ mag/arcsec}^2$ ($6,44 \text{ mcd/m}^2$). W czasie usuwania awarii przez pewien czas pozbawione światła były jedynie najbliższe okolice punktu pomiarowego w promieniu 200 m – wtedy zmierzona wartość $S_a = 17,72 \text{ mag/arcsec}^2$ ($8,90 \text{ mcd/m}^2$). Otrzymane wielkości oznaczają, że wkład oświetlenia badanego osiedla do jasności sztucznej poświaty niebieskiej w przypadku bezchmurnego nieba w punkcie pomiarowym wyniósł około 40%, natomiast wkład oświetlenia najbliższej okolicy aż 18%. Wartości te nie są w żaden sposób związane z procentowym udziałem powierzchni tych obszarów w powierzchni całej wyspy świetlnej Krakowa, wynoszącym odpowiednio 4% i 0,07%. Oznacza to, że lokalne

oświetlenie wpływa głównie na jasność sztucznej poświaty niebieskiej bezpośrednio powyżej źródła światła.

V. WNIOSKI

1. Analiza posiadanych danych pozwala twierdzić, że bezpośredni wpływ ekologiczny oświetlenia naziemnego jest ograniczony do nocnych organizmów latających. Sztuczna poświata niebieska wpływa na środowisko naturalne raczej tylko w zasięgu lokalnym, związanym z obszarami zamieszkałymi; wpływ ten jest najsilniejszy w przypadku nieba zachmurzonego niskimi chmurami, efektywnie odbijającymi światła naziemne.
2. W przypadku nieba bezchmurnego elementami rozpraszającymi światło stają się różnego rodzaju aerozole atmosferyczne, w tym m.in. mgły czy pyły zawieszone. Rozpraszanie to jest ograniczone do wysokości tzw. strefy mieszania, która w przypadku miast sięga w nocy do wysokości około 2 km. Kąt zenitalny światła rozproszonego na aerozolach atmosferycznych mieści się w granicach 60°-70°, co powoduje, że zasięg zenitalnej sztucznej poświaty niebieskiej wynosi w terenie, w przypadku dużych miast, około 30 km.
3. Tzw. wyspy świetlne są w rzeczywistości efektem nałożenia się na siebie rozświetleń nieba pochodzących od lokalnych źródeł światła, a ich profil związany jest z lokalnym profilem gęstości zaludnienia. Wielkość zanieczyszczenia świetlnego zależy bardzo silnie nie tylko od miejsca, lecz również od sposobu wykonywania pomiaru.

BIBLIOGRAFIA

1. Atlas klimatu Polski pod redakcją Haliny Lorenc, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej 2005. Warszawa. 2005.
2. Bruehlmann S.M. 2014. Measuring and Mapping Light Pollution at a Local Scale. Faculty of Earth and Life Sciences. Vrije Universiteit Amsterdam. Netherlands
3. Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D. 2001a. Naked eye star visibility and limiting magnitude mapped from DMSP-OLS satellite data. MNRAS. 323. 34-46
4. Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D. 2001b. The first World Atlas of the artificial night sky brightness. MNRAS. 328. 689-707.
5. Cinzano P., Falchi F. 2012. The propagation of light pollution in the atmosphere. MNRAS. 427. 3337-3357.
6. Davies T.W., Bennie J., Inger R., Gaston K.J. 2013. Artificial light alters regimes of natural sky brightness. Scientific Reports. 3. 1722.
7. Ecological consequences of artificial night lighting. 2006. Rich C., Longcore T. [red.] Island Press.
8. Gliwicz M. Z. 1986. A lunar cycle in zooplankton. Ecology. 67. 883-897.
9. Joseph J.H., Kaufman Y.J., Mekler Y. 1991. Urban light pollution: the effect of atmospheric aerosols on astronomical observations at night. Appl. Opt. 30. 3047-3058.
10. Kaszowski W., Ścieżor T., Kubala M. 2012. Wpływ warstw hamujących w atmosferze na sztuczną poświatę niebieską. [w:] Ochrona powietrza w teorii i praktyce. tom 2. Zabrze 2012. 111-118.
11. Kubala M., Ścieżor T., Dworak T.Z., Kaszowski W. 2009. Artificial Sky Glow in Cracow Agglomeration. Polish J. of Environ. Stud. 18. 3A. 194-199.
12. Kubala M., Ścieżor T., 2012. Oświetlenie gruntu przez zanieczyszczone świetlnie nocne niebo. Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska 2. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2012. 301-308.

13. Kyba C.C.M., Ruhtz T., Fischer J., Hölker F. 2011. Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems. PLoS ONE 6(3). e17307. doi:10.1371/journal.pone.0017307
14. Kyba C.C.M., Ruhtza T., Lindemanna C., Fischera J., Hölker F., Luginbuhl C.B. 2012. Angular distribution of uplight at 10,000 ft over Berlin. Proceedings of the International Astronomical Union. 10. H16. 738-738
15. Longcore T., Rich C. 2004. Ecological light pollution. Frontiers in Ecology and the Environment. 2. 4. 191-198.
16. Schreuder D.A. 2001. Sky Glow Measurements in the Netherlands. [in:] Preserving the Astronomical Sky, R.J. Kohen, W.T. Sullivan III [eds.]. International Astronomical Union Symposium. No. 196. Astronomical Society of the Pacific.
17. Seaman C. 2013. Beginner's Guide to VIIRS Imagery Data. CIRA/Colorado State University. [dok. elektr.: http://rammb.cira.colostate.edu/projects/npp/Beginner_Guide_to_VIIRS_Imagery_Data.pdf, data wejścia: 21.10.2016]
18. Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z. 2010. Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej. Monografia. 388. Politechnika Krakowska. Kraków 2010.
19. Ścieżor T., Kubala M. 2011. Zanieczyszczenie świetlne w otoczeniu wybranych zbiorników retencyjnych Małopolski. Czasopismo Techniczne – Środowisko. 108. 6. 235-245.
20. Ścieżor T., Kubala M. 2012. Wpływ chmur niskich i wysokich na bliskie i dalekie zanieczyszczenie świetlne. Czasopismo Techniczne. 2-Ś. 109. 23. 253-260.
21. Ścieżor T. 2013. A new astronomical method for determining the brightness of the night sky and its application to study long-term changes in the level of light pollution. MNRAS. 435. 303-310. doi: 10.1093/mnras/stt1297.
22. Ścieżor T., Kubala M. 2014. Particulate matter as an amplifier for astronomical light pollution. MNRAS. 444. 2487-2493. doi: 10.1093/mnras/stu1577.
23. Walczewski J. 1994. Charakterystyka warstwy granicznej nad miastem (na przykładzie Krakowa). Mat. Bad. IMGW. seria Meteorologia. 22. IMGW. Warszawa 1994.

PROPAGATION OF AN ARTIFICIAL LIGHTING IN THE ATMOSPHERE

Summary

The work discussed the problem of propagation of light originating from ground light sources. Such light impacts on the environment both directly as well as indirectly by dispersing on the atmospheric aerosols, contributing to the so-called artificial airglow. Such effect is especially important in the case of protected areas located in the vicinity of human settlements, which are the strong sources of light pollution.

Extinction of light in the atmosphere, as well as terrain or vegetation causes that at a distance just a few kilometres from light source its direct impact on the environment is negligible. In case of an artificial airglow, the situation is more complex. The analysis of the measurement data collected within a few years has shown that artificial airglow is ecologically important only in the case of overcast sky and that the important factor is the cloud base. It seems that with the low clouds this effect is practically limited to the part of celestial sphere located directly above the light source and disappears very quickly with increasing distance.

In case of a cloudless sky or with high clouds, the area of the lighted part of the sky is growing, but the contribution of light pollution in its surface brightness decreases

significantly. This means that while the artificial airglow of the cloudless sky is an important problem in astronomical observations, it has a rather negligible ecological impact.

The described analysis points to the need of protection of the near vicinity of protected areas first of all from defectively constructed ground lighting. It also indicates the possibility of preserving ecologically dark sky even in the vicinity of large urban centres. At the same time it confirms the necessity of location of astronomical observatories away from any human settlements.

Keywords: light pollution, artificial airglow, light intensity, illuminance, light island