

# SZTUCZNE

## ŚWIATŁO NOCĄ

Między zagrożeniem a rozwojem

pod redakcją  
Przemysława Tabaki



MONOGRAFIE  
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ 2022

# SZTUCZNE ŚWIATŁO NOCĄ MIĘDZY ZAGROŻENIEM A ROZWOJEM

Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej

Łódź 2022

Sfinansowano ze środków  
Ogólnopolskiej Akcji “1% na astronomię”  
KRS: 0000076686



[www.astroprocent.pl](http://www.astroprocent.pl)

Publikacja dofinansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.

Redaktor naukowy: Przemysław Tabaka

Recenzenci:

Andrzej Kotarba, Centrum Badań Kosmicznych PAN

Ewa Niemczura, Uniwersytet Wrocławski

Redakcja: Jolanta Szczepaniak

© Copyright by Politechnika Łódzka, Łódź 2022

ISBN 978–83–66741–46–1

DOI 10.34658/9788366741461

Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej  
93–005 Łódź, ul. Wólczańska 223  
tel. 42–631–20–87, 42–631–29–52  
[zamowienia@info.p.lodz.pl](mailto:zamowienia@info.p.lodz.pl)  
[www.wydawnictwo.p.lodz.pl](http://www.wydawnictwo.p.lodz.pl)

Monografie Politechniki Łódzkiej, Nr 2366

Nakład 200 egz.; 21 arkuszy drukarskich

Druk i oprawa: Drukarnia Quick–Druk, 90–562 Łódź, ul. Łąkowa 11

## SPIS TREŚCI

1. Przemysław Tabaka Wstęp.....	5
2. Marcin Zych „Gdzie ciemno tam przyjemno?” Skażenie światłem a sukces reprodukcyjny roślin .....	7
3. Anna Kołton, Renata Wojciechowska, Monika Czaja Modyfikacja budowy morfologicznej liści klonu jawora i dławiszka okrągłolistnego na skutek zanieczyszczenia światłem nocą .....	19
4. Krystyna Skwarło-Sońta Wpływ zanieczyszczenia światłem na fizjologię ptaków zamieszkujących miastach.....	35
5. Karolina Skorb Wpływ zanieczyszczenia sztucznym światłem na ptaki – podsumowanie badań .....	55
6. Lucyna Pilacka, Liliana Schönberger, Aleksandra Szurlej-Kiełańska Rozświetlona noc, jasne zagrożenie dla przyrody – wpływ ALAN na ptaki migrujące .....	77
7. Przemysław Tabaka, Justyna Wtorkiewicz Wpływ użytego luksomierza na wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w kontekście zanieczyszczenia światłem .....	93
8. Przemysław Tabaka, Karolina Rzezicka Studium przypadku wpływu oświetlenia parku na zanieczyszczenie światłem przy wykorzystaniu symulacji komputerowej .....	115
9. Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz Wertykalna zmienność jasności nocnego nieba w terenie zurbanizowanym ..	139
10. Tomasz Ścieżor Wpływ pandemii COVID-19 na zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba .....	161
11. Sylwester Kołomański, Przemysław J. Mikołajczyk, Krzysztof Kotysz, Piotr Łojko Jakość nocnego nieba w obserwatoriach astronomicznych na podstawie monitoringu prowadzonego przez sieć ALPS .....	201
12. Przemysław J. Mikołajczyk, Sylwester Kołomański, Krzysztof Kotysz, Adam Markiewicz, Piotr Łojko, Adam Wiernasz Rozwój sieci obserwacyjnej ALPS .....	221
13. Katarzyna Szlachetko Planowanie oświetlenia zewnętrznego w gminie. Aspekty prawoadministracyjne .....	235

14. Piotr Nawalkowski, Jakub Konior Dark Sky Community Sopotnia Wielka – pierwsza społeczność czynnej ochrony ciemnego nieba w Polsce. Wnioski i waloryzacja działań 10 lat po modernizacji oświetlenia przestrzeni publicznej .....	247
15. Karolina M. Zielińska-Dąbkowska Who is who w temacie zanieczyszczenia światłem sztucznym na świecie i w Polsce .....	275
16. Julia Gizewska, Paweł Biały, Jerzy Wojewódka Światło i ciemność – ulotna sztuka Ziemi .....	295
17. Zofia Czaplicka, Anna Czaplicka Rola światła w funkcjonowaniu miasta .....	315

## WSTĘP

Intensywne użytkowanie oświetlenia w porze nocnej doprowadziło do pojawienia się zjawiska nazywanego zanieczyszczeniem światłem. Skala tego zjawiska wciąż rośnie. Pomimo rozmiarów problemu, ta forma zanieczyszczenia środowiska jest najmniej znana. Niewiele osób zamieszkujących obszary mocno zurbanizowane zdaje sobie sprawę z istnienia tego problemu.

Olbrzymie korzyści związane ze światłem i negatywne skojarzenia z ciemnością są powodem, dla których zestawienie z pozoru dwóch przeciwstawnych słów, jakimi są „zanieczyszczenie” oraz „światło” wciąż budzi zdziwienie u wielu osób. Światło jest przecież jednym z podstawowych czynników warunkujących życie na ziemi. To dzięki niemu przecież możliwe jest postrzeganie otaczającego nas świata, poruszanie się w przestrzeni. Pod wpływem światła organizm człowieka produkuje witaminę D. To światło wpływa na samopoczucie, nastrój. Są liczne prace, które wskazują, że światło ma właściwości lecznicze. Niedobory światła mogą być źródłem depresji. Warto też nadmienić, że światło jest jednym z głównych źródeł energii podtrzymującej życie na Ziemi. Np. w fizjologii roślin szereg procesów uzależniony jest od światła. Bez światła nie byłby zatem możliwy wzrost i rozwój roślin. W wielu religiach światło jest symbolem boga. A zatem, ogólnie rzecz biorąc, światło jest źródłem życia, dobra, radości, tymczasem słowo „zanieczyszczenie” oznacza coś niepożądanego, niekorzystnego, szkodliwego, stwarzającego zagrożenie. O ile przyzwyczajono już nas do takich pojęć, jak zanieczyszczenie powietrza czy wody i terminy te występują w powszechnym obiegu, to wiele osób w Polsce, pomimo działalności wielu organizacji i prowadzenia akcji informacyjnych, nie słyszało o zanieczyszczeniu światłem. Istnieje coraz większa potrzeba ograniczenia zanieczyszczenia światłem poprzez redukcję skutków ubocznych wykorzystania sztucznego światła, przy jednoczesnym zachowaniu jego zalet jako niezbędnego elementu współczesnej cywilizacji. Osiągnięcie tego celu wymaga współpracy osób z wielu dziedzin nauki i techniki.

Głównym celem niniejszej monografii jest prezentacja wyników badań oraz studiów literaturowych poświęconych problematyce zanieczyszczenia światłem. Praca jest wynikiem doświadczenia zawodowego i efektów pracy naukowej autorów z różnych dziedzin nauki i techniki, takich jak: biologia roślin i zwierząt, technika świetlna, astronomia, nauki prawne, astroturystyka, architektura i urbanistyka. Cechą charakterystyczną monografii jest szerokie, interdyscyplinarne spojrzenie na oddziaływanie sztucznego światła na otoczenie. Cenną pomocą, którą zamieszczono w monografii, jest także poruszenie zagadnienia pomiarów zanieczyszczenia światłem.

W imieniu Autorów prac oraz własnym wyrażam nadzieję, że lektura monografii będzie dla Czytelników pożyteczna i przybliży problematykę zanieczyszczenia światłem, dostarczając przy tym szeregu nowych, bogatych informacji.

Na to, aby monografia powstała w takiej postaci złożyła się praca wielu osób. Chciałbym w tym miejscu serdecznie podziękować wszystkim Autorom poszczególnych rozdziałów. Bardzo dziękuję Recenzentom, za wnikliwe, konstruktywne i życzliwe uwagi. Ich praca niewątpliwie wpłynęła na poprawę jakości książki. Podziękowania należą się także wszystkim tym, którzy wspierali mnie w przygotowaniu edytorskim i technicznym monografii.

*Przemysław Tabaka*

# „GDZIE CIEMNO TAM PRZYJEMNO?” SKAŻENIE ŚWIATŁEM A SUKCES REPRODUKCYJNY ROŚLIN

Marcin Zych

Ogród Botaniczny, Wydział Biologii, Uniwersytet Warszawski  
*marcin.zych@uw.edu.pl*

**Streszczenie:** Rośliny są uzależnione od sygnałów środowiskowych sterujących ich rozwojem. Na przykład światło warunkuje efektywną fotosyntezę oraz rejestrowanie informacji o porze dnia i roku. Sztuczne światło nocą (ALAN) wyraźnie zmienia naturalne cykle światła/ciemności, co wpływa na kondycję fizjologiczną roślin i ich relacje ekologiczne. ALAN może działać bezpośrednio, poprzez modyfikację procesów fizjologicznych, takich jak fotosynteza czy naprawa uszkodzeń powodowanych przez czynniki stresowe, oraz poprzez modyfikowanie przebiegu procesów fenologicznych, takich jak kwitnienie bądź dojrzewanie owoców. Możliwy jest także wpływ pośredni związany ze zmienną reakcją zwierząt wchodzących z roślinami w różne powiązania ekologiczne, zarówno o charakterze antagonistycznym, jak i mutualistycznym. Wszystkie te procesy wpływają na sukces reprodukcyjny roślin, co ma znaczenie biologiczne (stabilność populacji roślinnych, trwałość ekosystemów) oraz ekonomiczne (produkcja żywności).

**Słowa kluczowe:** ALAN, mutualizm, relacje międzygatunkowe, roślinożerność, zapylanie

## 1. Wstęp

Jako organizmy osiadłe, rośliny są uzależnione od sygnałów środowiskowych sterujących ich rozwojem. Jednym z najważniejszych z nich jest światło, które jest konieczne do efektywnego prowadzenia procesu fotosyntezy oraz do rejestrowania informacji o środowisku, np. porze dnia czy roku. Ewolucja odpowiedzi fizjologicznej roślin zachodziła zasadniczo w dość stałym dwudziestoczworgodzinny cykl światła i ciemności oraz, z wyjątkiem obszarów tropikalnych, w warunkach zmieniającej się sezonowo długości dnia [1]. W trakcie ewolucji rośliny wykształciły więc szereg fotoreceptorów, które umożliwiają rejestrację sygnałów świetlnych emitowanych w różnych częściach spektrum fal elektromagnetycznych.



Jesteśmy ciągle dalecy od pełnego poznania podłoża molekularnego tych zagadnień, ale dla modelowego gatunku *Arabidopsis thaliana* opisano i scharakteryzowano istnienie jedenastu różnych fotoreceptorów, które absorbują światło w różnych zakresach widma [2]. Na przykład kryptochromy reagują na światło fioletowo-niebiesko-zielone (zakres fal 390–530 nm) [3], fototropiny są aktywne głównie w świetle niebieskim [4], natomiast maksimum absorpcji fitochromu A, w zależności od formy, przypada w świetle czerwonym (650–670 nm) i/lub dalekiej czerwieni (705–740 nm) [5]. Niestety, ze szczególnym natężeniem od początków XX wieku, coraz powszechniejsze zastosowanie zewnętrznych sztucznych źródeł światła w okolicach osiedli ludzkich, zakładów przemysłowych i rozwijającej się sieci dróg wyraźnie zmienia naturalne okołodobowe i sezonowe cykle światła/ciemności [6].

Powszechność zastosowania sztucznego oświetlenia powoduje, że obecnie niektóre obszary globu nawet na 100% powierzchni doświadczają zanieczyszczenia światłem. Aż 23% powierzchni lądów pomiędzy 75°N a 60°S, 88% powierzchni Europy i prawie 50% powierzchni USA doświadczą jasnych nocy [7]. Ponieważ antropogeniczne źródła emitują światło, które pokrywa się w dużej części z maksimami absorpcji fotoreceptorów roślinnych i jest rejestrowane przez organizmy zwierzęce, zanieczyszczenie światłem może indukować zmiany fizjologiczne lub behawioralne i wpływać w różnoraki sposób na wiele gatunków organizmów żywych [8, 9, 10]. Spośród nich to rośliny stanowią fundament ziemskich łańcuchów troficznych oraz stanowią podstawę diety ludzkiej, zatem badanie wpływu sztucznego światła emitowanego nocą (ALAN; od ang. *Artificial Light At Night*) na rośliny ma ogromne znaczenie poznawcze, ale także praktyczne. Należy tu jednak od razu zauważyć, że liczba badań w tej dziedzinie jest ciągle niezwykle skąpa.

O ile wpływ ALAN na fotosyntezę wydaje się, w świetle dostępnych badań, relatywnie niewielki i możliwy do zaobserwowania głównie w sytuacjach, w których organy fotosyntetyczne (liście) znajdują się w niewielkiej odległości od silnych źródeł światła (np. korony drzew pod przyulicznymi latarniami), o tyle nawet krótka ekspozycja na światło w nocy może wywołać wyraźną odpowiedź fizjologiczną roślin związaną, na przykład, z zakłóceniem fotoperiodu [1]. Efekty to, na przykład, nienaturalnie długie zachowywanie liści przez narażone na ALAN rośliny normalnie tracące liście na zimę, wcześniejsze pęknięcie pąków po okresie zimowego spoczynku, zahamowanie lub przyspieszenie kwitnienia i wzrostu [2].

Wszystkie te efekty mogą przekładać się na stan fizjologiczny roślin i wpływać na ich sukces reprodukcyjny. Przykładowo, w eksperymencie wykonanym na komonicy błotnej *Lotus pedunculatus* (rodzina bobowate, *Fabaceae*) wykazano, że obecność nocą pomarańczowego światła o fizycznych parametrach identycznych z emitowanym przez standardowe lampy sodowe, stosowane w oświetleniu przyulicznym, hamowało kwitnienie nawet o 25%. Nieco słabszy efekt, choć również zauważalny, miało zastosowanie białego światła emitowanego przez źródła LED [11]. Podobne skutki, około 50% redukcję kwitnienia, zaobserwowano w dzikiej populacji endemicznego wydmowego gatunku kanaryjskiego *Traganum moquinii* (rodzina bobowate, *Fabaceae*), rosnącej w naturalnym siedlisku narażonym na ALAN [12].

Słabo zbadaną kwestią, na którą także warto zwrócić uwagę w kontekście kondycji roślin, jest wpływ ALAN na procesy naprawy uszkodzeń powodowanych stresorami środowiskowymi. Należy do nich na przykład ozon O<sub>3</sub>, do którego powstawania przyczynia się, między innymi, ruch uliczny [13]. Wiadomo, że stężenie ozonu może mieć wyraźnie negatywne efekty na rośliny, związane z uszkodzeniami liści [14] oraz prowadzić do obniżenia ich sukcesu reprodukcyjnego [15]. Obecnie, uszkodzenia różnych gatunków roślin spowodowane ozonem są powszechnie obserwowane na wielu kontynentach [16, 17, 18], ze szczególną intensywnością na półkuli północnej [19]. Efekt ten przypisywany jest długim letnim dniom, które nie pozwalają roślinom na przeprowadzenie skutecznych procesów naprawczych zachodzących w tkankach roślinnych w ciemności [19].

Eksperymentalne badania prowadzone na trzech gatunkach koniczyny (*Trifolium*) wykazały, że w warunkach świetlnych odpowiadających narażeniu roślin na permanentne oświetlenie uliczne poziom uszkodzeń liści spowodowanych ozonem jest znacząco wyższy [20]. Oznacza to, że wraz ze wzrostem ALAN zwiększa się prawdopodobieństwo uszkodzeń roślin powodowanych ozonem, co może znacząco wpływać na ich stan fizjologiczny i, w efekcie, sukces reprodukcyjny. Temat ten, niestety, praktycznie nie doczekał się jednak żadnych badań eksperymentalnych.

Reakcja roślin na zmieniające się nocą parametry świetlne ma wpływ także na relacje ekologiczne, które łączą te organizmy ze zwierzętami odgrywającymi w ekosystemach rolę antagonistów (gatunki roślinożerne) lub mutualistycznych partnerów – zapylaczy kwiatów czy zwierzęta rozprzestrzeniające nasiona. Na przykład, w opisywanym wcześniej eksperymencie z koniczą zastosowano także wariant z wyspecjalizowanym roślinożercą *L. pedunculatus* – mszycą *Acyrtosiphon pisum* – w którym zaobserwowano sezonowy spadek populacji tego roślinożerco. Nastąpiło to w wyniku ograniczenia wzrostu i reprodukcji przez roślinę żywicielską, co wskazuje na efekty kaskadowe w ekosystemie [11].

Powyższy przykład oraz inne doniesienia pokazują, że zmiana reżimu świetlnego może powodować wręcz przebudowę niektórych ekosystemów, w których rośliny mają znaczący udział. W niniejszej pracy skupiono się właśnie na tych relacjach oraz ich wpływie na szeroko rozumiany sukces reprodukcyjny roślin (produkcję kwiatów i owoców/nasion).

## 2. Relacje ekologiczne

W układach ekologicznych światło może wpływać na stan roślin na drodze procesów zachodzących na zasadzie regulacji *bottom-up* (kontrola przez zasoby), *top-down* (kontrola przez gatunek antagonistyczny, na przykład roślinożercę) lub relacji pozatroficznych, w których powiązania międzygatunkowe, takie jak zapylanie kwiatów, modyfikowane są przez sztuczne światło [11].

Biorąc pod uwagę opisane wyżej efekty fizjologiczne wywoływane przez ALAN u roślin, można spodziewać się, że zmiana reżimu świetlnego może ograniczać lub stymulować wzrost pewnych gatunków roślin, co w sposób bezpośredni wpłynie na

przykład na liczebność roślinożerców [11]. Efekt *bottom-up* nie musi kończyć się jednak wyłącznie na jednym poziomie interakcji, lecz może dotyczyć także innych poziomów troficznych, na przykład drapieżców. Zjawisko takie zaobserwowano, przykładowo, w badaniach prowadzonych w europejskich półnaturalnych ekosystemach łąkowych, w których eksperymentalnie manipulowano bogactwem gatunkowym oraz funkcjonalną różnorodnością roślin. Dla części roślinożernych bezkręgowców (prostoskrzydłe), wraz ze spadkiem bogactwa gatunkowego roślin zanotowano spadek liczebności ich populacji, a wzrost funkcjonalnej różnorodności roślinności korelował dodatnio z liczebnością bezskrzydłych mszyc oraz ujemnie z aktywnością części drapieżnych stawonogów [21].

W przypadku efektów *top-down*, znane są zjawiska gromadzenia się lub lokalnego wzrostu liczebności populacji drapieżców przy źródłach światła [22]. Może to prowadzić do zwiększonej presji na ofiary, na przykład gatunki roślinożerców, lub unikania przez nie obszarów obfitujących w drapieżniki, co z kolei zmniejszy presję na rośliny, umożliwiając im skuteczniejszą reprodukcję [11]. Jak dotąd brak jednak eksperymentalnych badań potwierdzających te hipotezy.

### 3. Zapylenie kwiatów

Relacje nieantagonistyczne najłatwiej przedstawić na przykładzie zapylenia kwiatów przez zwierzęta, z których część, na przykład nietoperze (*Chiroptera*, rodziny *Pteropodidae* i *Phyllostomidae*) czy motyle nocne (*Lepidoptera*), powszechnie znane są jako gatunki nocne. Grupa zapyłaczy, aktywna po zmroku, jest jednak znacznie większa i obejmuje także niektóre pszczołowate (*Apidae*), chrząszcze (*Coleoptera*), muchówki (*Diptera*), przyłżeńce (*Thysanoptera*) oraz – marginalnie – niektóre inne kręgowce związane z kwiatowym pokarmem [23, 24, 25].

Grupa nocnych zapyłaczy jest bardzo słabo poznana, a obecne dane wskazują, że jest ich niewiele ponad 1000 gatunków, choć liczba ta wydaje się znacznie niedoszacowana [24]. Podobnie, nieznaną jest nawet przybliżona liczba gatunków roślin, które podlegają zapyleniu przez owady aktywne po zmroku. Dostępne dane wskazują, że nocne zapylenie występuje u 30% rodzin roślin okrytozalążkowych, jednak reprezentacja zapyłanych nocą roślin jest nierównomierna: należy do nich aż 97% rodzin charakteryzujących się fotosyntezą C3, 2/3 rodzin o fotosyntezie CAM i 71% rodzin dwuliściennych o fotosyntezie C4, z wyraźną nadreprezentacją gatunków kserofitycznych, czyli występujących w siedliskach ubogich w wodę. Taki obraz wskazywałby, że nocne kwitnienie i zapylenie może być przystosowaniem do ograniczania stresu wodnego [26].

Z całą pewnością jednak wśród zapyłanych nocą gatunków znajdują się zarówno rośliny uprawne, jak i ważne kulturowo czy ginące i zagrożone. Do tej pierwszej grupy można zaliczyć na przykład bananowce *Musa*, agawę *Agave tequilana*, duriana *Durio zibethinus* i muszkatołowiec korzenny *Myristica fragrans* (prawdopodobnie częściowo także kawę *Coffea arabica*, bakłażana *Solanum melongena* czy awokado *Persea americana*). Wśród zapyłanych przez zwierzęta nocne roślin o wartości kulturowej

wymienia się *Paullinia cupana* znaną jako guarana, będącą w Ameryce Południowej źródłem kofeiny czy jaśminowce *Jasminum sp.* służące – szczególnie w Azji – do aromatyzowania napojów oraz przedstawiciele rodzaju wiciokrzew *Lonicera sp.* [24].

Warto tu jednak zauważyć, że rośliny odwiedzane przez zapylacze nocne są często atrakcyjne także dla zwierząt aktywnych za dnia, co w części może łagodzić ewentualne ograniczenie lub zmianę aktywności tych pierwszych [27]. Z kolei dla wielu gatunków uprawnych nie prowadzono nigdy obserwacji nocnych zapylaczy, więc ich rola może być znacząco zaniżona. Pokazuje to przykład borówki wąskolistnej *Vaccinium angustifolium*, w której przypadku dopiero niedawno ustalono, że dzienne owady są około ¼ skuteczniejsze w zapylaniu kwiatów, jednak wyłącznie nocne zapylanie zapewnia ok. 30-procentowy sukces reprodukcyjny rośliny, natomiast masa owoców zapylanych przez dzienne i nocne owady nie różni się statystycznie [28].

Niestety, dane, w których uwzględniano by ekosystemową rolę nocnych zapylaczy są bardzo skąpe. Przykładowo, badania prowadzone w Szkocji ujawniły, że około 25% spośród 103 odławianych gatunków motyli nocnych przenosi pyłek kilkunastu gatunków roślin, jednak zdecydowana większość z tych owadów specjalizuje się na jednym, konkretnym gatunku [29]. Dość zbieżne wyniki uzyskano także dla nocnej sieci zapyleń na archipelagu Balearów, gdzie ok 21% odławianych dorosłych motyli nocnych z rodziny sówkowatych (*Noctuidae*) przenosiło na swoich ciałach ładunki pyłku. Owady odwiedzały 27 taksonów roślin (wiadomo jednak, że z uwagi na zastosowaną metodę – analizę mikroskopową pyłku, która nie pozwala na rozróżnienie ziaren pyłku blisko spokrewnionych roślin – faktycznie gatunków pokarmowych było więcej, patrz [30]), ale aż 46% wizyt odbywało się na kwiatach niewielkiego drzewa z rodziny wrzosowatych (*Ericaceae*) chruściny jagodnej (*Arbutus unedo*) [31].

Autorzy ostatniego opracowania konkludują o wysokiej generalizacji zarówno gatunków motyli, jak i roślin. Inny obraz nocnej sieci zapyleń opisano dla górskich ekosystemów z Himalajów (Indie Północno-Wschodnie). Spośród 140 stwierdzonych tam gatunków motyli nocnych przenoszących pyłek roślin aż 65% charakteryzowało się wysoką efektywnością zapylania roślin z 21 rodzin taksonomicznych. Dominującą grupą wśród motyli byli przedstawiciele rodziny miernikowców (*Geometridae*), najaktywniejsi na wysokości 2000–2500 m n.p.m. [32]. Z powyższych przykładów wynika, że nocne sieci zapyleń mogą charakteryzować się znaczącą zmiennością geograficzną, szczególnie, jeżeli chodzi o proporcje gatunków roślin uzależnionych od zapylaczy aktywnych nocą.

Od dłuższego czasu wiadomo już, że ALAN może znacząco modyfikować zachowanie zwierząt nocnych oraz negatywnie wpływać na ich procesy fizjologiczne [33]. Mechanizmy reakcji na światło są różne w zależności od grupy taksonomicznej i zostały już szeroko przedyskutowane w literaturze [8, 9, 24, 34, 35, 36].

Zmiany takie są istotne z punktu widzenia procesów reprodukcyjnych roślin, ponieważ globalnie szacunki wskazują, że blisko 90% gatunków roślin okrytozalążkowych wykorzystuje zwierzęta w procesie transportu pyłku pomiędzy kwiatami, co skutkuje zapylaniem, a następnie zapłodnieniem [37]. Konsekwencją efektywnego

zapylenia kwiatów jest produkcja przez rośliny nasion i owoców, co gwarantuje stabilność ich populacji. Zaburzenie tych relacji może zaś skutkować zjawiskiem określanym jako limitacja pyłkiem (ang. *pollen limitation*), czyli suboptymalną produkcją nasion spowodowaną niewystarczającą ilością pyłku lub pyłkiem złej jakości [38, 39].

Eksperymentalne badania prowadzone w Europie przez Knop *et al.* [27] wykazały, że nocne światło LED zmniejsza o 62% aktywność na kwiatach owadów nocnych, skutkując eliminacją z zanieczyszczonej światłem sieci zapyleń blisko 1/3 gatunków zapylaczy. Dla uwzględnionego w szczegółowej analizie gatunku ostrożeńa łąkowego (*Cirsium olearaceum*, rodzina *Asteraceae*) zanotowano z kolei 13% spadek sukcesu reprodukcyjnego mierzonego stopniem zawiązywania nasion. Co ciekawe, roślina ta jest odwiedzana zarówno przez owady nocne, jak i dzienne, a uzyskane wyniki świadczą, że ograniczenie nocnych odwiedzin na kwiatach nie jest kompensowane przez dzienne zapylacze.

W przypadku południowoamerykańskiego krzewu *Erythrostemon gilliesii* (rodzina *Fabaceae*) zaobserwowano, że osobniki narażone na największe zanieczyszczenie światłem oraz rosnące pod niskim okapem drzew otrzymywały najmniejsze ładunki pyłku na znamionach słupka [40], a efektywność zapyłania rosła wraz z oddalaniem się od źródeł światła [41].

Odmienne skutki zanieczyszczenia światłem (i hałasem) odnotowano natomiast dla europejskiej byliny lepnicy białej (*Silene latifolia*, rodzina *Caryophyllaceae*). Rośliny oświetlane przez całą noc wykazywały wyższy sukces w zapyłaniu kwiatów niż te utrzymywane w ciemności lub oświetlane przez część nocy. W zależności od zastosowanego źródła światła – lamp sodowych lub LED – różnice ujawniały się w zależności od reżimu oświetlenia. W przypadku całonocnego oświetlenia nie zanotowano różnic pomiędzy typami oświetlenia, natomiast w wariancie oświetlanym przez część nocy lepsze wyniki zanotowano dla roślin oświetlanych lampami sodowymi. W badaniach zauważono także, że efekt działania dziennych i nocnych zapylaczy był komplementarny, choć owady aktywne nocą odpowiadały za większą frakcję zapyleń (53%) niż dzienne (38%) [42].

pozytywne skutki ALAN zaobserwowano także dla neotropikalnego drzewa puchowca pięciopręcikowego (*Ceiba pentandra*, rodzina *Malvaceae*). Choć i w tym badaniu zaobserwowano spadek aktywności zapylaczy – tym razem nietoperzy – to nie przekładało się to na późniejszy spadek efektywności zapyłania. Autorzy zanotowali wręcz pozytywne efekty zanieczyszczenia światłem na sukces reprodukcyjny puchowca, co tłumaczone jest lepszą kondycją fotosyntetyczną i przedłużonym sezonem wegetacyjnym roślin pozwalającym utrzymać więcej owoców i nasion [43]. Stawiałoby to pod znakiem zapytania wcześniejsze sugestie o zaniedbywalnym wpływie ALAN na aktywność fotosyntetyczną roślin w warunkach naturalnych [1, 27].

## 4. Podsumowanie

Dotychczasowe badania wskazują, że sztuczne światło nocą (ALAN) może znacząco wpływać na sukces reprodukcyjny roślin kwiatowych. Wpływ ten może zachodzić bezpośrednio, poprzez modyfikację procesów fizjologicznych, takich jak fotosynteza czy naprawa uszkodzeń powodowanych przez czynniki stresowe (np. podwyższone stężenie ozonu), oraz poprzez modyfikowanie przebiegu procesów fenologicznych, takich jak kwitnienie bądź dojrzewanie owoców. Możliwy jest także wpływ pośredni związany ze zmienną reakcją zwierząt wchodzących z roślinami w różne powiązania ekologiczne, zarówno o charakterze antagonistycznym, jak i mutualistycznym. W tym pierwszym przypadku modyfikacja zachowania może dotyczyć bezpośrednio antagonistów, np. roślinożerców. Ułatwiając im odnajdywanie roślin stanowiących pożywienie, ALAN wpływałby na obniżenie sukcesu reprodukcyjny roślin. Alternatywnie, światło może modyfikować zachowanie drapieżników, powodując na przykład ich agregację w oświetlonych miejscach, co z kolei wpływałoby na redukcję liczebności ich ofiar, a więc mniejszą presję na rośliny. Podobne efekty mogą dotyczyć relacji z zapylaczami wykazującymi różną wrażliwość na ALAN.

Dostępne dane pokazują, że finalne reakcje mogą być pozytywne lub negatywne, a kierunek zmian jest specyficzny gatunkowo. Zbyt skąpe dane eksperymentalne nie pozwalają jednak na obecnym etapie wyciągać bardziej ogólnych wniosków dotyczących, na przykład, podobnej reakcji blisko spokrewnionych taksonów. Biorąc pod uwagę ekosystemową i ekonomiczną wagę procesów reprodukcyjnych roślin, studia dotyczące wpływu ALAN na rozmnażanie tych organizmów powinny być jednym z globalnych priorytetów badawczych.

## Literatura

- [1] Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Gaston K.J., *Ecological effects of artificial light at night on wild plants*, *Journal of Ecology*, 2016, 104(3), s. 611–620, DOI: 10.1111/1365-2745.12551.
- [2] Briggs W.R., *Physiology of plant responses to artificial lighting*, [w:] *Ecological consequences of artificial night lighting*, C. Rich, T. Longcore (eds.), Washington, DC: Island Press, 2006. s. 389–412.
- [3] Ahmad M., Grancher N., Heil M., Black R.C., Giovani B., Galland P., Lardemer D., *Action Spectrum for Cryptochrome-Dependent Hypocotyl Growth Inhibition in Arabidopsis*, *Plant Physiology*, 2002, 129(2), s. 774–785, DOI: 10.1104/ss.010969.
- [4] Christie J.M., *Phototropin Blue-Light Receptors*, *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58(1), s. 21–45, DOI: 10.1146/annurev.arplant.58.032806.103951.
- [5] Casal J.J., Candia A.N., Sellaro R., *Light perception and signalling by phytochrome A*, *Journal of Experimental Botany*, 2013, 65(11), s. 2835–2845, DOI: 10.1093/jxb/ert379.
- [6] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., *The first world atlas of the artificial night sky brightness*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, 328, s. 689–707.

- [7] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, 2016, 2(6), s. 25, DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- [8] Longcore T., Rich C., *Ecological light pollution*, Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, 2(4), s. 191–198, DOI: 10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP] 2.0.CO;2.
- [9] Gaston K.J., Bennie J., Davies T.W., Hopkins J., *The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal*, Biological Reviews, 2013, 88(4), ss. 912–927, DOI:10.1111/brv.12036.
- [10] Davies T.W., Duffy J.P., Bennie J., Gaston K.J., *The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution*, Frontiers in Ecology and the Environment, 2014, 12(6), s. 347–355, DOI: 10.1890/130281.
- [11] Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Inger R., Gaston K.J., *Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem*, Philosophical Transactions of the Royal Society B–Biological Sciences, 2015, 370(1667), s. 9, DOI: 10.1098/rstb.2014.0131.
- [12] Viera-Pérez M., Hernández-Calvento L., Hesp P.A., Santana-del Pino A., *Effects of artificial light on flowering of foredune vegetation*, Ecology, 2019, 100(5), art no. e02678, DOI: 10.1002/ecy.2678.
- [13] Munir S., Chen H., Ropkins K., *Modelling the impact of road traffic on ground level ozone concentration using a quantile regression approach*, Atmospheric Environment, 2012, 60, s. 283–291.
- [14] Pell E.J., Schlaghauser C.D., Artega R.N., *Ozone-induced oxidative stress: Mechanisms of action and reaction*, Physiologia Plantarum, 1997, 100(2), s. 264–273, DOI: 10.1034/j.1399-3054.1997.1000207.x.
- [15] Black V.J., Black C.R., Roberts J.A., Stewart C.A., *Impact of ozone on the reproductive development of plants*, New Phytologist, 2000, 147(3), s. 421–447, DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00721.x
- [16] Mills G., Hayes F., Simpson D., Emberson L., Norris D., Harmens H., Buker P., *Evidence of widespread effects of ozone on crops and (semi-)natural vegetation in Europe (1990–2006) in relation to AOT40-and flux-based risk maps*, Global Change Biology, 2011, 17(1), s. 592–613, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02217.x.
- [17] Novak K., Skelly J.M., Schaub M., Krauchi N., Hug C., Landolt W., Bleuler P., *Ozone air pollution and foliar injury development on native plants of Switzerland*, Environmental Pollution, 2003, 125(1), s. 41–52, DOI: 10.1016/s0269-7491(03)00085-x.
- [18] Feng Z.Z., Sun J.S., Wan W.X., Hu E.Z., Calatayud V., *Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China*, Environmental Pollution, 2014, 193, s. 296–301, DOI: 10.1016/j.envpol.2014.06.004.
- [19] Vollsnes A.V., Eriksen A.B., Otterholt E., Kvaal K., Oxaal U., Futsaether C.M., *Visible foliar injury and infrared imaging show that daylength affects short-term recovery after ozone stress in Trifolium subterraneum*, Journal of Experimental Botany, 2009, 60(13), s. 3677–3686, DOI: 10.1093/jxb/erp213.
- [20] Futsaether C.M., Vollsnes A.V., Kruse O.M.O., Otterholt E., Kvaal K., Eriksen A.B., *Effects of the Nordic Photoperiod on Ozone Sensitivity and Repair in Different Clover Species*

- Studied Using Infrared Imaging*, *Ambio*, 2009, 38(8), s. 437–442, DOI: 10.1579/0044-7447-38.8.437.
- [21] Koricheva J., Mulder C.P.H., Schmid B., Joshi J., Huss-Danell K., *Numerical responses of different trophic groups of invertebrates to manipulations of plant diversity in grasslands*, *Oecologia*, 2000, 125(2), s. 271–282, DOI: 10.1007/s004420000450.
- [22] Davies T.W., Bennie J., Gaston K.J., *Street lighting changes the composition of invertebrate communities*, *Biology Letters*, 2012, 8(5), s. 764–767, DOI: 10.1098/rsbl.2012.0216.
- [23] Willmer P., *Pollination and floral ecology*, Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2011.
- [24] Macgregor C.J., Scott–Brown A.S., *Nocturnal pollination: an overlooked ecosystem service vulnerable to environmental change*, *Emerging Topics in Life Sciences*, 2020, 4(1), s. 19–32, DOI: 10.1042/etls20190134.
- [25] Cordeiro G.D., Liporoni R., Caetano C.A., Krug C., Martínez-Martínez C.A., Martins H.O.J., Cardoso R.K.O.A., Araujo F.F., Araújo P.C.S., Oliveira R., Schindwein C., Warrant E.J., Dötterl S., Alves dos Santos L., *Nocturnal Bees as Crop Pollinators*, *Agronomy*, 2021, 11(5), s. 1014.
- [26] Borges R.M., Somanathan H., Kelber A., *Patterns and Processes in Nocturnal and Crepuscular Pollination Services*, *The Quarterly Review of Biology*, 2016, 91(4), s. 389–418, DOI: 10.1086/689481.
- [27] Knop E., Zoller L., Ryser R., Gerpe C., Hörler M., Fontaine C., *Artificial light at night as a new threat to pollination*, *Nature*, 2017, 548(7666), s. 206–209, DOI: 10.1038/nature23288.
- [28] Cutler G.C., Reeh K.W., Sproule J.M., Ramanaidu K., *Berry unexpected: Nocturnal pollination of lowbush blueberry*, *Canadian Journal of Plant Science*, 2012, 92(4), s. 707–711, DOI: 10.4141/cjps2012-026.
- [29] Devoto M., Bailey S., Memmott J., *The 'night shift': nocturnal pollen–transport networks in a boreal pine forest*, *Ecological Entomology*, 2011, 36(1), s. 25–35, DOI: 10.1111/j.1365-2311.2010.01247.x.
- [30] Jędrzejewska-Szmek K., Zych M., *Flower–visitor and pollen transport networks in a large city: structure and properties*, *Arthropod–Plant Interactions*, 2013, 7(5), s. 503–516, DOI: 10.1007/s11829-013-9274-z.
- [31] Ribas-Marquès E., Díaz–Calafat J., Boi M., *The role of adult noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) and their food plants in a nocturnal pollen–transport network on a Mediterranean island*, *Journal of Insect Conservation*, 2022, 26, s. 243–255, DOI: 10.1007/s10841-022-00382-7.
- [32] Singh N., Lenka R., Chatterjee P., Mitra D., *Settling moths are the vital component of pollination in Himalayan ecosystem of North–East India, pollen transfer network approach revealed*, *Scientific Reports*, 2022, 12(1), s. 2716, DOI: 10.1038/s41598-022-06635-4.
- [33] Zych M., Ryniewicz J., *Nocna zmiana: w jaki sposób zanieczyszczenie światłem wpływa na mutualistyczne relacje roślin i ich zapylaczy?*, [w:] *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, Kotarba A.Z. (red.), Warszawa: Centrum Badań Kosmicznych PAN, 2019, s. 55–68.



- [34] Grubisic M., van Grunsven R.H.A., Kyba C.C.M., Manfrin A., Hölker F., *Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter?*, *Annals of Applied Biology*, 2018, 173(2), s. 180–189, DOI: 10.1111/aab.12440.
- [35] Falcón J., Torriglia A., Attia D., Viénot F., Gronfier C., Behar-Cohen F., Martinsons C., Hicks D., *Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems*, *Frontiers in Neuroscience*, 2020, 14, art no. 602796, DOI: 10.3389/fnins.2020.602796.
- [36] Briolat E.S., Gaston K.J., Bennie J., Rosenfeld E.J., Troscianko J., *Artificial nighttime lighting impacts visual ecology links between flowers, pollinators and predators*, *Nature Communications*, 2021, 12(1), s. 4163, DOI: 10.1038/s41467-021-24394-0.
- [37] Ollerton J., Winfree R., Tarrant S., *How many flowering plants are pollinated by animals?*, *Oikos*, 2011, 120(3), s. 321–326, DOI: 10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x.
- [38] Knight T.M., Steets J.A., Vamosi J.C., Mazer S.J., Burd M., Campbell D.R., Dudash M.R., Johnston M.O., Mitchell R.J., Ashman T.-L., *Pollen limitation of plant reproduction: pattern and process*, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 36, s. 467–497, DOI: 10.2307/30033813.
- [39] Ashman T.-L., Knight T.M., Steets J.A., Amarasekare P., Burd M., Campbell D.R., Dudash M.R., Johnston M.O., Mazer S.J., Mitchell R.J., Morgan M.T., Wilson W.G., *Pollen limitation of plant reproduction: ecological and evolutionary causes and consequences*, *Ecology*, 2004, 85(9), s. 2408–2421, DOI: 10.1890/03-8024.
- [40] Bariles J.B., Cocucci A.A., Soteris F., *Pollination and fitness of a hawkmoth-pollinated plant are related to light pollution and tree cover*, *Biological Journal of the Linnean Society*, 2021, 134(4), s. 815–822, DOI: 10.1093/biolinnean/blab114.
- [41] Soteris F., Camps G.A., Costas S.M., Giaquinta A., Peralta G., Cocucci A.A., *Fragility of nocturnal interactions: Pollination intensity increases with distance to light pollution sources but decreases with increasing environmental suitability*, *Environmental Pollution*, 2022, 292, art. 118350, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118350.
- [42] Macgregor C.J., Pocock M.J.O., Fox R., Evans D.M., *Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant*, *Ecosphere*, 2019, 10(1), art. e02550, DOI:10.1002/ecs2.2550.
- [43] Dzul-Cauich H.F., Munguía-Rosas M.A., *Negative effects of light pollution on pollinator visits are outweighed by positive effects on the reproductive success of a bat-pollinated tree*, *The Science of Nature*, 2022, 109(1), s. 12, DOI: 10.1007/s00114-021-01783-5.

## SOME LIKE IT DARK? IMPACT OF LIGHT POLLUTION ON PLANT REPRODUCTIVE SUCCESS

**Abstract:** Plants depend on environmental signals that control their development. For example, light is essential for efficient photosynthesis and for capturing information about the time of day and year. Artificial light at night (ALAN) clearly changes the natural light/dark cycles, which affects the physiological condition of plants and their ecological relationships. ALAN can act directly by modifying physiological processes such as photosynthesis or repairing stress-induced damage, and by modifying phenological processes, eg. flowering or fruit ripening. An indirect influence related to the variable reaction of animals involved in various ecological relationships, both antagonistic and mutualistic, with plants is also possible. All these processes affect the reproductive success of plants, which has biological (stability of plant populations, durability of ecosystems) and economic (food production) importance.

**Keywords:** ALAN, herbivory, mutualism, plant–animal interactions, pollination



# MODYFIKACJA BUDOWY MORFOLOGICZNEJ LIŚCI KLONU JAWORA I DŁAWISZA OKRĄGŁOLISTNEGO NA SKUTEK ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM NOCĄ

**Anna Kołton**

Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
*anna.kolton@urk.edu.pl*

**Renata Wojciechowska**

Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
*renata.wojciechowska@urk.edu.pl*

**Monika Czaja**

Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
*monika.czaja@urk.edu.pl*

**Streszczenie:** Rośliny wykorzystują światło jako źródło energii do fotosyntezy. Jest ono także sygnałem regulującym wzrost i rozwój roślin. Ciemność umożliwia regulację rytmów biologicznych roślin. Przeprowadzono doświadczenie, w trakcie którego jednoroczne siewki roślin drzewiastych (klon jawora i dławisz okrągłolistny) uprawiano w doniczkach. Rośliny były umieszczone w naturalnych warunkach dnia i nocy (kontrola) oraz oświetlane w trakcie nocy lampą LED (zanieczyszczenie światłem), ponadto, jedną część roślin ustawiono w szklarni, natomiast drugą poza szklarnią. Niezależnie od warunków termicznych światło w nocy wpływało na istotne zmniejszenie długości blaszek liściowych. Podobnie szerokość blaszek była mniejsza pod wpływem nocnego oświetlenia z wyjątkiem liści klonu rosnącego w szklarni. Nocne oświetlenie stymulowało zwiększenie grubości blaszek liściowych badanych roślin. Podsumowując, liście pod wpływem zanieczyszczenia światłem były mniejsze, ale grubsze, co przełoży się na dyfuzję gazów do ich wnętrza.

**Słowa kluczowe:** fotoperiod, stres świetlny, drzewa miejskie, wielkość liścia, grubość liścia

## 1. Wstęp

Rośliny są wrażliwe na światło. Taką informację możemy znaleźć nawet w doniesieniach z III–IV wieku p.n.e. [1]. Co to oznacza w dobie współczesnej nauki? Światło wpływa na rośliny w dwojaki sposób. Po pierwsze, jest źródłem energii do przeprowadzenia procesu fotosyntezy, w wyniku którego powstają związki organiczne i tlen [2]. Po drugie, jest źródłem informacji o otoczeniu, środowisku, w którym rosną rośliny [3, 4]. W trakcie dnia, ale także w ciągu roku zmienia się natężenie promieniowania słonecznego, kierunek padania promieni, długość fazy jasnej (dnia) i ciemnej (nocy) w cyklu 24-godzinnym oraz skład spektralny promieniowania [5, 6]. Rośliny reagują na zmiany zarówno ilości, jakości, kierunku padania, jak i czasu trwania promieniowania [7].

Wszystkie te informacje docierające do roślin z zewnątrz (ze środowiska) regulują metabolizm, wzrost i rozwój roślin, umożliwiają orientację w porze dnia czy roku. Nieprzypadkowo niektóre rośliny zrzucają liście jesienią, zimą pozostają w stanie bezliśnym, po czym wiosną podejmują intensywny wzrost. Jest to reakcja na zmiany zachodzące w środowisku zewnętrznym, szeroko regulowana, umożliwiająca roślinom przetrwanie trudnego okresu [8, 9]. Bodziec zewnętrzny, jakim jest światło, może być odbierany przez roślinę dzięki wielu receptorom znajdującym się w jej organizmie [10, 11]. Fotoreceptory umożliwiają zachodzenie fotosyntezy oraz zjawisk fotomorfo-genetycznych, oraz regulację zegara biologicznego [3, 12].

Znane jest zjawisko wpływu światła na budowę blaszki liściowej drzew [13, 14, 15]. Obserwowano na przykład zmiany w budowie liści buka (*Fagus sylvatica*) w warunkach naturalnej długości dnia i nocy, gdzie część korony była lepiej, a część gorzej oświetlona promieniowaniem słonecznym. Autorzy wykazali, że w części zewnętrznej korony, do której dociera więcej promieniowania, zwykle blaszki liściowe mają mniejszą powierzchnię, ale są grubsze, a dodatkowo zmienia się skład barwników w blaszce, rośnie zawartość chlorofili na jednostkę powierzchni. Natomiast w części wewnętrznej korony, do której dociera mniej promieniowania, liście mają zwykle większą powierzchnię, są cieńsze i zawierają więcej chlorofili w przeliczeniu na suchą masę [13]. Jednocześnie cytowani autorzy wykazali, że liście z dobrze oświetlanej części korony mają wyższą wydajność fotosyntetyczną. Kolejne doświadczenie prowadzone było na czterech gatunkach drzew (*Acer pseudoplatanus*, *Fagus sylvatica*, *Tilia cordata*, *Abies alba*) [14]. Wykazano, że w pełnym słońcu powstały liście grubsze o większej zawartości chlorofili i karotenoidów w przeliczeniu na jednostkę powierzchni w porównaniu do liści rozwijających się w ocienieniu. Oba typy liści różniły się także parametrami fluorescencji chlorofilu *a*. Głęboką analizę wpływu zacienienia na morfologię liści przeprowadzono u jodły pospolitej [15]. Liście (igły) w pełni oświetlone miały dobrze rozwinięty miękisz palisadowy, więcej aparatów szparkowych i, co ciekawe, były większe niż liście rosnące w cieniu. Liście nasłonecznione charakteryzowały się także wyższą zdolnością do niefotochemicznego wygaszania zaabsorbowanej energii czy zwiększoną szybkością transportu elektronów. Z przytoczonych prac jasno wynika, że światło modyfikuje budowę

anatomiczną blaszki liściowej, a co za tym idzie także jej funkcjonowanie. Budowa liścia determinuje przebieg fotosyntezy, która odpowiada za produkcję asymilatów i jest najważniejszym procesem zachodzącym w liściach.

Warto też wspomnieć, że światło – jako czynnik zewnętrzny regulujący wzrost i rozwój – może stać się dla rośliny czynnikiem stresowym. Możemy mówić o stresie świetlnym przy nadmiarze promieniowania (widzialnego czy UV), niedoborze promieniowania, niewłaściwym składzie spektralnym lub gdy obserwujemy niewłaściwy czas oświetlenia roślin. Nadmiar promieniowania prowadzić może do nadmiernego wzbudzenia fotosystemów, a w efekcie do uszkodzenia aparatu fotosyntetycznego i nawet śmierci komórek. Aby chronić aparat fotosyntetyczny przed nadmiarem promieniowania, rośliny wykształciły mechanizmy rozpraszania nadmiaru zabsorbowanego promieniowania [16].

Rośliny traktowane niską intensywnością promieniowania mogą manifestować niedobór światła na różny sposób [17]. Można zaobserwować zmiany w budowie morfologicznej rośliny: liście są cieńsze, pędy i ogonki liściowe wydłużone, położenie liści zwykle horyzontalne, u roślin rozetowych występuje rozluźnienie w budowie rozety, zwykle obserwuje się opóźnione kwitnienie. Zmieniają się także cechy fizjologiczne i biochemiczne roślin. Obserwuje się mniejsze zagęszczenie aparatów szparkowych, duże chloroplasty, niższy punkt kompensacyjny świetlny fotosyntezy, zmniejszone fotooddychanie, mniejszą zawartość antocyjanów w skórce, niższą zawartość karotenoidów czy cukrów rozpuszczalnych.

Niedobór światła może powodować uruchamianie syndromu unikania cienia [18, 19]. Jest on zwykle obserwowany u roślin, które są zacieniane przez inne rośliny, np. pod okapem koron starszych osobników. Światło docierające do takich roślin jest przefiltrowane przez liście znajdujące się nad nimi i charakteryzuje się niskim stosunkiem promieniowania czerwonego (*R red* – czerwony) do dalekiej czerwieni (*FR far red* – daleka czerwień) (*R:FR*). Takie rośliny całkowicie zmieniają swój metabolizm i budowę po osiągnięciu odpowiednich rozmiarów i lepszych warunków świetlnych. Siewki wielu drzew na początku swojego życia mają niewystarczającą ilość światła i rosną dość szybko, wytwarzają małą ilość rozgałęzień bocznych, ich pęd główny wydłuża się bardzo szybko. Gdy osiągną lepsze warunki świetlne – wyrosną ponad inne rośliny – wydłużanie ich pędu zwalnia, pojawiają się rozgałęzienia boczne, zmienia się skład chemiczny ich liści – zaczynają produkować substancje chroniące przed nadmiarem promieniowania. Sygnał dotyczący warunków zewnętrznych odbierany jest przez fotoreceptory, ale w odpowiedzi roślin biorą udział także liczne hormony roślinne.

Reakcje stresowe związane z niewłaściwym składem spektralnym były obserwowane w trakcie uprawy roślin z wykorzystaniem sztucznych źródeł promieniowania [20, 21]. Należy jednak podkreślić, że rośliny wykazują dużą plastyczność w dostosowywaniu fotosyntezy oraz swojej budowy morfologicznej i anatomicznej do danego składu spektralnego światła, w którym rosną [22]. Dużym stresem może okazać się nagła zmiana jakości promieniowania w otoczeniu rośliny, na przykład przy przenoszeniu roślin z warunków szklarniowych do środowiska naturalnego [23].

Promieniowanie UV uruchamia wtedy mechanizmy odpornościowe u roślin [24], jednak wymaga to czasu.

Niewłaściwy czas oświetlenia związany jest z działalnością człowieka i oświetlaniem roślin ze sztucznych źródeł, światłem nie pochodzącym od Słońca, Księżyca czy gwiazd. Rośliny mogą być oświetlane przez człowieka celowo w czasie uprawy pod osłonami oraz w sposób niezamierzony przy okazji oświetlenia innych obiektów, np. przez lampy uliczne [4]. Światło, które powinno służyć człowiekowi, często produkowane jest w nadmiarze, przedostaje się do środowiska powodując zanieczyszczenie światłem. Obserwujemy, że rośliny są oświetlane w porach, kiedy powinny być poddane naturalnej ciemności. Problem ten jest szczególnie istotny w miastach i na terenach silnie zurbanizowanych. Wpływ zanieczyszczenia światłem na rośliny został opisany szerzej przez Wojciechowską [25, 26], Kolton i in. [4], Czaję i in. [27].

Do najważniejszych efektów zanieczyszczenia światłem można zaliczyć zmiany fenologiczne u roślin, czyli następowanie kolejnych faz wzrostowo-rozwojowych. Obserwuje się wcześniejsze otwieranie pąków drzew i krzewów w rejonach poddanych silnemu zanieczyszczeniu światłem [28], a także opóźnienie fazy wchodzenia w spoczynek i jesiennego zrzucania liści [29]. Najnowsze badania wykazały również, że zanieczyszczenie światłem stanowi dla roślin czynnik stresowy. Kwak i in. [30] wykazali, że rośliny tulipanowca amerykańskiego *Liriodendron tulipifera* L. oświetlane nocą nawet niską intensywnością promieniowania mają niższą zawartość barwników oraz podwyższony wyciek elektrolitów, co jest popularnym markerem stresu. Warto jednak podkreślić, że ciągle powstaje niewiele prac doświadczalnych opisujących wpływ zanieczyszczenia światłem na funkcjonowanie roślin i nie wszystkie reakcje zostały wyjaśnione.

Celem pracy była ocena budowy morfologicznej liści dwóch gatunków roślin drzewiastych pod wpływem nocnego oświetlenia (zanieczyszczenia światłem). Biorąc pod uwagę dotychczasowe dane literaturowe, postawiono hipotezę badawczą, że zaburzenie rytmu dnia i nocy przez oświetlanie roślin po zmroku będzie modyfikować budowę morfologiczną blaszki liściowej.

## 2. Materiały i metody

Materiał roślinny wykorzystany w doświadczeniu stanowiły jednoroczne rośliny (klon jawor *Acer pseudoplatanus* – drzewo i dławisz okrągłolistny *Celastrus orbiculatus* – pnącze) uprawiane w doniczkach. Rośliny były umieszczone w naturalnych warunkach dnia i nocy (kontrola) oraz oświetlane w trakcie nocy lampą LED (zanieczyszczenie światłem), ponadto jedną część roślin ustawiono w szklarni, natomiast drugą poza szklarnią (doświadczenie prowadzono w różnych warunkach termicznych). W doświadczeniu wyznaczono cztery grupy roślin traktowanych odmiennymi warunkami, w każdej grupie znajdowało się po 5 roślin z każdego gatunku.

Doświadczenie rozpoczęto 22 lutego, gdy rośliny w fazie spoczynku zimowego ustawiono w odpowiednich miejscach. Obserwacji i pomiarów roślin przetrzymywanych w szklarni dokonano 31 maja, natomiast roślin trzymanyh poza szklarnią 24 czerwca. Średnia temperatura w trakcie uprawy w szklarni wynosiła 19,2°C, natomiast w warunkach zewnętrznych 12,1°C (różnica pomiędzy średnimi temperaturami warunków zewnętrznych i szklarnią wynosiła około 7°C, przy czym minimalna temperatura na zewnątrz w okresie doświadczenia wynosiła -7°C, a w szklarni 13°C, natomiast maksymalna na zewnątrz 34°C, a w szklarni 44°C).

Pomiarów długości i szerokości blaszki liściowej dokonano z wykorzystaniem suwmiarki elektronicznej. Ponadto wykonano pomiary grubości blaszki liściowej z użyciem grubościomierza zegarowego (Mitutoyo, Japan). Liście zeskanowano na skanerze Epson perfection V600 photo wraz ze znacznikiem długości, a następnie oznaczono powierzchnię blaszek liściowych z wykorzystaniem programu ImageJ 1.49v [31]. W przypadku klonu do pomiarów brano drugą od wierzchołka wzrostu parę liści, natomiast w przypadku roślin dławiszka mierzono liście 9–11, licząc od wierzchołka wzrostu pędu, aby porównując liście drzew traktowanych i nie traktowanych światłem w nocy wyeliminować błąd wynikający z różnicy wielkości liści w różnym wieku. Z każdej rośliny pobierano po dwa liście do oznaczeń.

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej. Zbadano podobieństwo do rozkładu normalnego danych uzyskanych w eksperymencie za pomocą testu Shapiro–Wilka oraz homogeniczność wariancji za pomocą testu Levene'a. Uzyskane wyniki pozwoliły na wykorzystanie testu t–Studenta w analizie statystycznej danych. Wszystkie testy przeprowadzono z użyciem oprogramowania STATISTICA 13 [32], przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Na wykresach przedstawiono średnie wartości badanych parametrów, a różnice istotne statystycznie oznaczono gwiazdką.

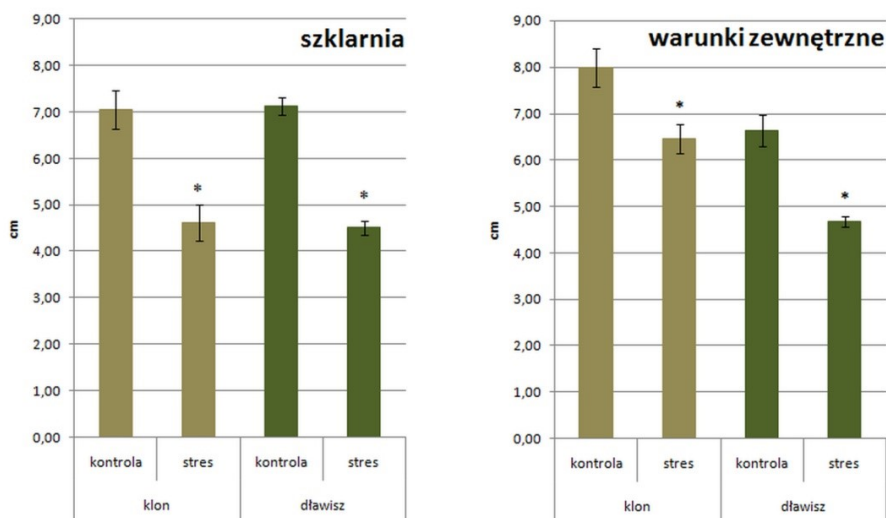
### 3. Wyniki i dyskusja

W prezentowanym doświadczeniu rośliny przetrzymywano w różnych warunkach środowiska zewnętrznego – w szklarni oraz poza nią w warunkach zewnętrznych (naturalnych). Rośliny w szklarni poddane były wyższym temperaturom – nie doświadczały przymrozków. Natomiast rośliny ustawione poza szklarnią doświadczały temperatur ujemnych, występujących w okresie trwania doświadczenia. Takie zaplanowanie eksperymentu pozwoliło ocenić wpływ zastosowanego oświetlenia w nocy w dwóch zróżnicowanych termicznie środowiskach. Wielu autorów podaje, że rozwój liści na wiosnę, następowanie faz fenologicznych czy budowa liścia to procesy regulowane przez oba czynniki – światło i temperaturę [9, 33].

Nasze badania podejmują problem, czy niezależnie od temperatury nocne oświetlenie roślin będzie wpływać na budowę ich liści. Oświetlenie roślin w nocy promieniowaniem innym niż pochodzące od Księżycy czy gwiazd jest uznawane za traktowanie stresem zanieczyszczenia światłem [2]. To sztuczne promieniowanie pochodzi z działalności człowieka, jego źródłem może być promieniowanie emitowane z lamp ulicznych, pojazdów, reklam, oświetlenia budynków itp. [34, 35, 36].

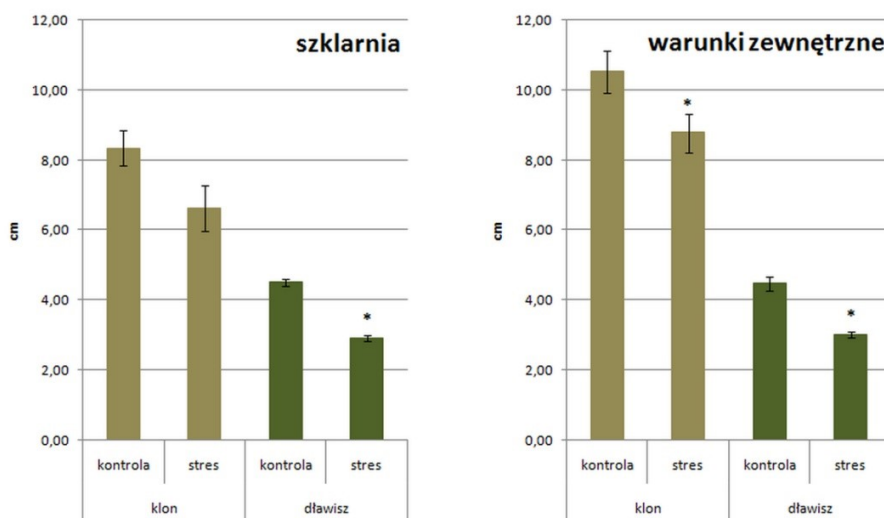


W prezentowanym doświadczeniu wykazano, że czynnik stresowy, jakim jest oświetlanie roślin w nocy, ograniczył długość i szerokość blaszki liściowej obu badanych gatunków zarówno w szklarni, jak i poza nią (rys. 1 i 2).



**Rys. 1.** Długość blaszki liściowej (średnia) u dwóch gatunków roślin przetrzymywanych w szklarni lub warunkach zewnętrznych w naturalnym fotoperiodzie (kontrola – noc i dzień) oraz traktowanych światłem w nocy (stres), wąsy oznaczają  $\pm$  błąd standardowy, \* wynik istotnie różny od kontroli

Źródło: opracowanie własne.



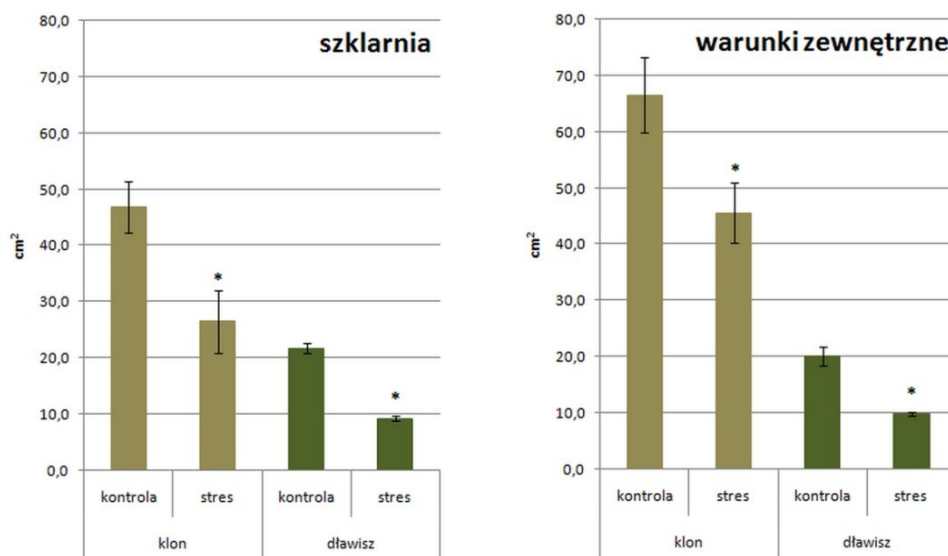
**Rys. 2.** Szerokość blaszki liściowej (średnia) u dwóch gatunków roślin przetrzymywanych w szklarni lub warunkach zewnętrznych w naturalnym fotoperiodzie (kontrola – noc i dzień) oraz traktowanych światłem w nocy (stres), wąsy oznaczają  $\pm$  błąd standardowy, \* wynik istotnie różny od kontroli

Źródło: opracowanie własne.

Statystycznie istotnego zmniejszenia szerokości blaszki liściowej pod wpływem stresu zanieczyszczenia światłem nie udało się udowodnić tylko w przypadku klonu uprawianego w szklarni. Jednocześnie wykazano istotne zmniejszenie powierzchni blaszki liściowej obu badanych gatunków pod wpływem stresu zanieczyszczenia światłem w nocy w obu miejscach uprawy (w różnych warunkach termicznych; rys. 3).

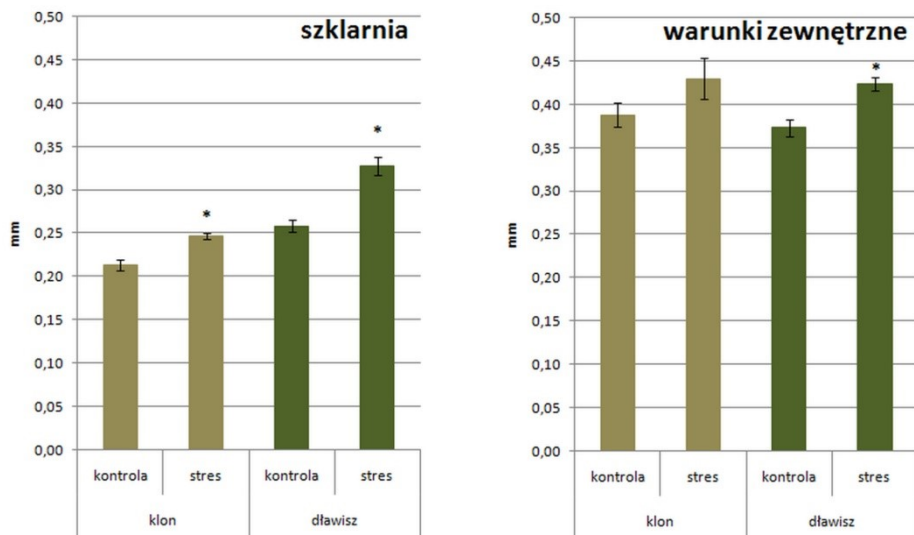
Wpływ fotoperiodu – długości dnia i nocy – na powierzchnię blaszki liściowej wykazano u chryzantemy [37]. Rośliny rosnące w oświetleniu ciągłym (fotoperiod 24h/0h) miały większą powierzchnię blaszki liściowej niż z fotoperiodu 8h/16h i 12h/12h, ale mniejszą w porównaniu do 18-godzinnego oświetlenia.

W szklarni blaszki liściowe klonu i dławisza traktowane stresem świetlnym wynikającym z oświetlenia w nocy charakteryzowały się większą grubością niż u roślin rosnących w naturalnym fotoperiodzie (rys. 4). Natomiast w warunkach zewnętrznych tylko u dławisza zaobserwowano podobną reakcję zwiększenia grubości blaszki liściowej pod wpływem stresu zanieczyszczenia światłem.



**Rys. 3.** Powierzchnia blaszki liściowej (średnia) u dwóch gatunków roślin przetrzymywanych w szklarni lub warunkach zewnętrznych w naturalnym fotoperiodzie (kontrola – noc i dzień) oraz traktowanych światłem w nocy (stres), wąsy oznaczają  $\pm$  błąd standardowy, \* wynik istotnie różny od kontroli.

*Źródło: opracowanie własne.*



**Rys. 4.** Grubość blaszki liściowej (średnia) u dwóch gatunków roślin przetrzymywanych w szklarni lub warunkach zewnętrznych w naturalnym fotoperiodzie (kontrola – noc i dzień) oraz traktowanych światłem w nocy (stres), wąsy oznaczają  $\pm$  błąd standardowy, \* wynik istotnie różny od kontroli

Źródło: opracowanie własne.

Podobne obserwacje dotyczące wielkości i grubości liści przedstawiła Sarijeva i in. [38] dla liści buka i miłorzębu. Blaszkli liściowe lepiej oświetlone były mniejsze i grubsze niż te rozwijające się w gorszych warunkach świetlnych [38]. Rośliny reagują na stres środowiskowy poprzez modyfikację organów wegetatywnych [39]. Badania prowadzone na trzech gatunkach dębów (*Q. alba*, *Q. palustris* i *Q. velutina*) wykazały, że liście pobrane z zewnętrznej (lepiej oświetlonej) części korony były znacząco mniejsze (o mniejszej powierzchni), grubsze i bardziej klapowane od liści pobranych z wnętrza korony (słabiej oświetlonych). Co więcej, wykazano, że liście z południowej części korony były mniejsze lub grubsze od tych pobranych z części północnej [39].

Ten kierunek zmian morfologicznych w zależności od dostępu światła w poszczególnych partiach korony potwierdza kolejne doświadczenie. Analiza siedmiu gatunków drzew liściastych rosnących w lesie (w Japonii): olchy (*Alnus hirsuta*), brzozy (*Betula platyphylla* var. *japonica*), orzecha (*Juglans ailanthifolia* Carrière), jesionu (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*), lipy (*Tilia japonica*), wiązu (*Ulmus davidiana* var. *japonica*) i klonu (*Acer mono*) wykazała, że wielkość oraz grubość blaszek liściowych zależy od ich wertykalnego położenia i zwiększa się od wierzchołka do podstawy korony. Związane jest to z lepszym dostępem światła w górnych częściach koron drzew rosnących w zwarciu [40]. Mniejsze blaszki liściowe w warunkach lepszego dostępu do światła wykazano także u buka pospolitego (*Fagus sylvatica* L.), klonu jawora (*Acer pseudoplatanus* L.) i jesionu wyniosłego (*Fraxinus excelsior* L.) rosnących w lesie w Niemczech [41]. Podobnie dla *Quercus acutissima* i *Robinia pseudoacacia*

(uprawianych w pojemnikach) wykazano, że wielkość blaszek liściowych była negatywnie skorelowana z dostępem światła [42].

W badaniach nad *Quercus petraea* na pięciu naturalnych stanowiskach we Włoszech wykazano, że najgrubsze liście były położone w najbardziej zewnętrznych tj. najlepiej oświetlonych częściach korony, natomiast największą maksymalną szerokość blaszek obserwowano w wewnętrznych częściach koron (nie wykazano różnic dla długości blaszek) [43]. Odmienne wyniki uzyskali Segrestin i in. [44] w badaniach na roślinach wodnych, wykazując jedynie niewielkie zmiany w budowie liści czy ich funkcjonowaniu pod wpływem zanieczyszczenia światłem. Zastosowane w doświadczeniu natężenie promieniowania w nocy było na poziomie  $0,05 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Promieniowanie, na które są narażone drzewa miejskie, szczególnie w bezpośrednim sąsiedztwie latarni przyulicznych jest znacznie wyższe [4].

Zmiany w budowie anatomiczno–morfologicznej liści wpływają na ich funkcjonowanie. W przypadku roślin buka i miłorzębu obserwowano zmiany w budowie liści pod wpływem zróżnicowanego promieniowania, a co za tym idzie, zmieniała się wydajność fotosyntetyczna takich blaszek [38]. Podczas fotoperiodu 24h/0h trwającego od 3 do 4 miesięcy obserwowano obniżenie wydajności fotosyntetycznej u cypryśnika błotnego i metasekwoi chińskiej [45].

W produkcji ogrodniczej od wielu lat próbuje się stosować 24-godzinne oświetlanie roślin w celu intensyfikacji wzrostu roślin i zwiększenia plonowania. Jednak wykazano, że rośliny traktowane światłem przez całą dobę mogą reagować negatywnie na brak fazy ciemności. W produkcji ogórka porównywano zastosowanie fotoperiodu 18h/6h i 24h/0h i wykazano, że ciągłe oświetlanie wpływa na niższą produkcję owoców, wywołuje chlorozy na młodych liściach i nie jest zalecane w produkcji towarowej [46]. Podobnie, negatywne efekty traktowania roślin przez 24 godziny światłem wykazano w uprawie truskawki [47], róż [48, 49] czy papryki słodkiej [50].

Badano również reakcje pomidora na oświetlanie przez 12h i 24h na dobę oraz tej samej dziennej sumie promieniowania (to samo DLI – *daily light integral*). Wykazano, że u roślin traktowanych światłem całą dobę dziesiąty liść był krótszy, ale tej samej szerokości co liście z 12h fotoperiodu. Całkowita powierzchnia liści na roślinę nie różniła się u roślin z obu traktowań [51]. Autorzy stosowali zmianę spektrum promieniowania przy ciągłym oświetlaniu, za dnia używano promieniowania czerwonego a w nocy niebieskiego. Prawdopodobnie dlatego nie obserwowano negatywnych efektów nocnego oświetlania roślin pomidora w postaci uszkodzeń liści, chloroz czy obniżonego plonowania, co obserwowali inni badacze [52, 53, 54].

W dostępnej literaturze trudno znaleźć prace innych autorów o wpływie zanieczyszczenia światłem na budowę morfologiczną blaszki liściowej drzew, jednak z wyżej przytoczonych prac jednoznacznie wynika, że traktowanie roślin światłem całodobowym modyfikuje strukturę i funkcje liści, co ma przełożenie na funkcjonowanie całych roślin. Procesy życiowe roślin zachodzą nocą w bardzo ograniczonym stopniu – transport wody i asymilatów nocą to około 10% dobowego transportu tych składników [55]. Aparaty szparkowe są wówczas w znacznym stopniu przymknięte,

a zatem ograniczona zostaje wymiana gazowa [56]. Co ciekawe, podczas działania czynnika stresowego roślina zamyka aparaty szparkowe bardziej niż w warunkach korzystnych, limitując wymianę gazową jeszcze bardziej [56]. Ciemność jest niezbędna do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin [57, 58], zapewnia prawidłowe funkcjonowanie aparatów szparkowych, powoduje zmniejszenie aktywności metabolicznej, obniżenie poziomu reaktywnych form tlenu i stresu oksydacyjnego – jest fazą odpoczynku i regeneracji organizmu [59, 60, 61].

#### 4. Podsumowanie

Problem zanieczyszczenia światłem jest szeroko badany ze względu na jego negatywny wpływ na organizmy żywe. Wciąż mało jest prac badawczych, dotyczących konkretnych reakcji roślin na ten typ stresu. W przeprowadzonym doświadczeniu wykazano, że oświetlanie roślin nocą światłem LED modyfikuje budowę morfologiczną liści roślin drzewiastych. Co więcej, reakcje klonu i dławisza na stres zanieczyszczenia światłem zaobserwowano w dwóch kombinacjach doświadczenia – zarówno w warunkach, gdzie panował naturalny rozkład temperatur w tym przymrozki wiosenne, jak i w szklarni, gdzie temperatury były wyższe.

Uzyskane wyniki są zbieżne z doniesieniami dotyczącymi zmian budowy morfologicznej liści pod wpływem różnego napromieniowania w obrębie korony. Błazki liściowe klonu i dławisza w reakcji na stres zanieczyszczenia światłem charakteryzowała mniejsza powierzchnia, ale większa grubość. Należy jednak podkreślić, że obserwowane zmiany były specyficzne dla reakcji na oświetlenie nocne; nie wynikały one ze zróżnicowanego dostępu światła dziennego do różnych części korony. Reakcje roślin na stres najczęściej prowadzą do zaburzeń nie tylko struktury, ale i funkcji. Dlatego można założyć, że zanieczyszczenie światłem w nocy w efekcie zmian w budowie anatomiczno–morfologicznej liści będzie wpływało na procesy fizjologiczne i biochemiczne, zaburzając normalny wzrost i rozwój roślin.

#### Literatura

- [1] Schäfer E., Nagy F., *Historical overview*, [w:] *Photomorphogenesis in Plants and Bacteria*, E. Schäfer, F. Nagy (eds.), Springer, Dordrecht 2006, s. 1–12.
- [2] Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Bell F., Gaston K.J., *Ecological effects of artificial light at night on wild plants*, *Journal of Ecology* 2016, 104, 3, s. 611–620, DOI: 10.1111/1365–2745.12551.
- [3] Kong S. G., Okajima K., *Diverse photoreceptors and light responses in plants*, *Journal of Plant Research*, 2016, 129, s. 111–114, DOI: 10.1007/s10265–016–0792–5.
- [4] Kołton A., Czaja M., Długosz–Grochowska O., *Artificial lighting and light pollution from the plant's point of view*, [w:] *Ecological and astronomical aspects of light pollution*, T.Ścieżor (red.), Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2021, s. 39–55.
- [5] Strømme C.B., Julkunen–Tiitto R., Krishna U., Lavola A., Olsen J.E., Nybakken L., *UV–B and temperature enhancement affect spring and autumn phenology in *Populus tremula**, *Plant, Cell & Environment*, 2015, 38, 5, s. 867–877, DOI:10.1111/pce.12338.

- [6] Chiang C., Olsen J.E., Basler D., Bånkestad D., Hoch G., *Latitude and Weather Influences on Sun Light Quality and the Relationship to Tree Growth*, *Forests*, 2019, 10, 8, s. 610, DOI: 10.3390/f10080610.
- [7] Kharshiing E., Sreelakshmi Y., Sharma R., *The light awakens! Sensing light and darkness*, [w:] *Sensory biology of plants*, S. Sopory (ed.), Springer, Singapore 2019, s. 21–57.
- [8] Olsen J.E., *Light and temperature sensing and signaling in induction of bud dormancy in woody plants*, *Plant Molecular Biology*, 2010, 73, 1–2, s. 37–47, DOI: 10.1007/s11103-010-9620-9.
- [9] Maurya J.P., Bhalerao R.P., *Photoperiod- and temperature-mediated control of growth cessation and dormancy in trees: a molecular perspective. Invited review*, *Annals of Botany* 2017, 120, 3, s. 351–360, DOI: 10.1093/aob/mcx061.
- [10] Paik I., Huq E., *Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks*, *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 2019, vol. 92, s. 114–121, DOI: 10.1016/j.semcdb.2019.03.007.
- [11] Galvão V.C., Fankhauser C., *Sensing the light environment in plants: photoreceptors and early signaling steps*, *Current Opinion in Neurobiology*, 2015, 34, s. 46–53, DOI: 10.1016/j.conb.2015.01.013.
- [12] Barneche F., Malapeira J., Mas P., *The impact of chromatin dynamics on plant light responses and circadian clock function*, “*Journal of Experimental Botany*” 2014, 65, 11, s. 2895–2913, DOI: 10.1093/jxb/eru011.
- [13] Lichtenthaler H.K., Buschmann C., Döll M., Fietz H.J., Bach T., Kozel U., Meier D., Rahmsdorf U., *Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves*, *Photosynthesis Research*, 1981, 2, s. 115–141, DOI: 10.1007/BF00028752.
- [14] Lichtenthaler H.K., Ač A., Marek M.V., Kalina J., Urban O., *Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species*, *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45, 8, s. 577–588, DOI: 10.1016/j.plaphy.2007.04.006.
- [15] Dörken V. M., Lepetit, B., *Morpho-anatomical and physiological differences between sun and shade leaves in *Abies alba* Mill. (Pinaceae, Coniferales): a combined approach*, *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41, 7, s. 1683–1697, DOI: 10.1111/pce.13213.
- [16] Lu D., Zhang Y., Zhang A., Lu C., *Non-Photochemical Quenching: From Light Perception to Photoprotective Gene Expression*, *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(2), s. 687, DOI: 10.3390/ijms23020687.
- [17] Mathur S., Jain L., Jajoo A., *Photosynthetic efficiency in sun and shade plants*, *Photosynthetica*, 2018, 56, 1, s. 354–365, DOI: 10.1007/s11099-018-0767-y.
- [18] Fernández-Milmanda G.L., Ballaré, C.L., *Shade Avoidance: Expanding the Color and Hormone Palette*, *Trends in Plant Science*, 2021, 26, 5, s. 509–523, DOI: 10.1016/j.tplants.2020.12.006.
- [19] Sessa G., Carabelli M., Possenti M., Morelli G., Ruberti, I., *Multiple pathways in the control of the shade avoidance response*, *Plants*, 2018, 7, 4, s. 102, DOI: 10.3390/plants7040102.
- [20] Goins G.D., Yorio N.C., Sanwo M.W., Brown C.S., *Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting*, *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48, 312, s. 1407–1413, DOI: 10.1093/jxb/48.7.1407.

- [21] Hogewoning S.W., Trouwborst G., Maljaars H., Poorter H., van Leperen W., Harbinson J., *Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of Cucumis sativus grown under different combinations of red and blue light*, Journal of Experimental Botany, 2010, 61, 11, s. 3107–3117, DOI: 10.1093/jxb/erq132.
- [22] Naznin M.T., Lefsrud M., *An overview of LED lighting and spectra quality on plant photosynthesis*, [w:] *Light Emitting Diodes for Agriculture – Smart Lighting*, S. Dutta Gupta (ed.), Springer, Singapore 2017, s. 101–111, DOI: 10.1007/978–981–10–5807–3\_6.
- [23] Wojciechowska R., Kunicki E., Długosz–Grochowska O., Kołton A., *Response of broccoli transplants to LED light during short and long–term storage*, Agronomy, 2020, 10, 7, s. 1009, DOI: 10.3390/agronomy10071009.
- [24] Dotto M., Casati P., *Developmental reprogramming by UV–B radiation in plants*, Plant Science, 2017, 264, s. 96–101, DOI: 10.1016/j.plantsci.2017.09.006.
- [25] Wojciechowska R., *Czy oświetlenie nocne może zaburzać funkcjonowanie roślin? [w:] Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, A. Kotarba (red.) Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa, 2019, s. 39–54.
- [26] Wojciechowska R., *Czy rośliny reagują na oświetlenie nocą?*, Aura, 2019, 5, s. 3–8.
- [27] Czaja M., Kołton A., Muras P., *The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities*, Forests, 2020, 11, 9, s. 932, DOI: 10.3390/f11090932.
- [28] Ffrench-Constant R.H., Somers-Yeates R., Bennie J., Economou T., Hodgson D., Spalding A., McGregor P., *Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016, 283, art no. 20160813, DOI: 10.1098/rspb.2016.0813.
- [29] Škvareninová J., Tuhárska M., Škvarenina J., Babálová D., Slobodníková L., Slobodník B., Středová H., Mindáš J., *Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment*, Moravian Geographical Reports, 2017, 25, 4, s. 282–290, DOI: 10.1515/mgr–2017–0024.
- [30] Kwak M.J., Je S.M., Cheng H.C., Seo S.M., Park J.H., Baek S.G., Khaine I., Lee T., Jang J., Li Y., Kim H., Lee J.K., Kim J., Woo S.Y., *Night light–adaptation strategies for photosynthetic apparatus in yellow–poplar (Liriodendron tulipifera L.) exposed to artificial night lighting*, Forests, 2018, 9, 2, s. 74, DOI: 10.3390/f9020074.
- [31] ImageJ, Image Processing and Analysis in Java, <https://imagej.nih.gov/ij/> (dostęp: 18.03.2022).
- [32] TIBCO Software Inc. 2017. Statistica (data analysis software system), version 13, <http://statistica.io> (dostęp: 18.03.2022).
- [33] Flynn D.F.B., Wolkovich E.M., *Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community*, New Phytologist, 2018, 219, 4, s. 1353–1362, DOI: 10.1111/nph.15232.
- [34] Bennie J., Davies T.W., Duffy J.P., Inger R., Gaston K.J., *Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed nighttime lights*, Scientific Reports, 2014, 4, art. 3789, DOI:10.1038/srep03789.
- [35] Singhal R.K., Kumar M., Bose B., *Eco–physiological responses of artificial night light pollution in plants*, Russian Journal of Plant Physiology, 2019, 66, s. 190–202, DOI:10.1134/S1021443719020134.
- [36] Tabaka P., *Influence of Replacement of Sodium Lamps in Park Luminaires with LED Sources of Different Closest Color Temperature on the Effect of Light Pollution and Energy Efficiency*, Energies, 2021, 14, 19, art. 6383, DOI: 10.3390/en14196383.

- [37] Warrington I.J., Norton R.A., *An evaluation of plant growth and development under various daily quantum integrals*, Journal of the American Society for Horticultural Science, 1991, 116, 3, s. 544–551, DOI: 10.21273/JASHS.116.3.544.
- [38] Sarijeva G., Knapp M., Lichtenthaler H.K., *Differences in photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid levels, and in chlorophyll fluorescence parameters in green sun and shade leaves of Ginkgo and Fagus*, "Journal of Plant Physiology" 2007, 164, 7, s. 950–955, DOI: 10.1016/j.jplph.2006.09.002.
- [39] Kusi J., Karsai I., *Plastic leaf morphology in three species of Quercus: The more exposed leaves are smaller, more lobated and denser*, Plant Species Biology, 2020, 35, 1, s. 24–37, DOI: 10.1111/1442–1984.12253.
- [40] Koike T., Kitao M., Maruyama Y., Mori S., Lei T.T., *Leaf morphology and photosynthetic adjustments among deciduous broad-leaved trees within the vertical canopy profile*, Tree Physiology, 2001, 21, 12–13, s. 951–958, DOI: 10.1093/treephys/21.12–13.951.
- [41] Petrișan A.M., von Lüpke B., Petrișan I.C., *Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (Fagus sylvatica L.), maple (Acer pseudoplatanus L.) and ash (Fraxinus excelsior L.) saplings*, European Journal of Forest Research, 2009, 128, s. 61–74, DOI: 10.1007/s10342–008–0239–1.
- [42] Xu F., Guo W., Xu W., Wei Y., Wang R., *Leaf morphology correlates with water and light availability: what consequences for simple and compound leaves?*, Progress in Natural Science, 2009, 19, 12, s. 1789–1798, DOI: 10.1016/j.pnsc.2009.10.001.
- [43] Bruschi P., Grossoni P., Bussotti, F., *Within-and among-tree variation in leaf morphology of Quercus petraea (Matt.) Liebl. natural populations*, Trees, 2003, 17, 2, s. 164–172, DOI: 10.1007/s00468–002–0218–y.
- [44] Segrestin J., Mondy N., Boisselet C., Guigard L., Lengagne T., Poussineau S., Secondi J., Puijalon S., *Effects of artificial light at night on the leaf functional traits of freshwater plants*, Freshwater Biology, 2021, 66, 12, s. 2264–2271, DOI:10.1111/fwb.13830.
- [45] Equiza M.A., Day M.E., Jagels R., *Physiological responses of three deciduous conifers (Metasequoia glyptostroboides, Taxodium distichum and Larix laricina) to continuous light: adaptive implications for the early Tertiary polar summer*, Tree Physiology, 2006, 26, 3, s. 353–364, DOI: 10.1093/treephys/26.3.353.
- [46] Wolff S.A., Langerud A., *Fruit yield, starch content and leaf chlorosis in cucumber exposed to continuous lighting*, European Journal of Horticultural Science, 2006, 71, 6, s. 259–261.
- [47] Hidaka K., Okamoto A., Araki T., Miyoshi Y., Dan K., Imamura H., Kitano M., Sameshima K., Okimura M., *Effect of photoperiod of supplemental lighting with light-emitting diodes on growth and yield of strawberry*, Environmental Control in Biology, 2014, 52, 2, s. 63–71, DOI: 10.2525/ecb.52.63.
- [48] Mortensen L.M., Fjeld T., *Effects of air humidity, lighting period and lamp type on growth and vase life of roses*, Scientia Horticulturae, 1998, 4(73), s. 229–237, DOI: 10.1016/S0304–4238(98)00075–2.
- [49] Arve L.E., Terfa M.T., Gislerød H.R., Olsen J.E., Torre S., *High relative air humidity and continuous light reduce stomata functionality by affecting the ABA regulation in rose leaves*, Plant, Cell & Environment, 2013, 2(36), s. 382–392, DOI: 10.1111/j.1365–3040.2012.02580.x.
- [50] Demers D.A., Gosselin A., Wien H.C., *Effects of supplemental light duration on greenhouse sweet pepper plants and fruit yields*, Journal of the American Society for Horticultural Science, 1998, 2(123), s. 202–207, DOI: 10.21273/JASHS.123.2.202.



- [51] Lanoue J., Zheng J., Little C., Thibodeau A., Grodzinski B., Hao, X., *Alternating red and blue light-emitting diodes allows for injury-free tomato production with continuous lighting*, *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10, art. 1114, DOI: 10.3389/fpls.2019.01114.
- [52] Demers D., Gosselin A., *Supplemental lighting of greenhouse vegetables: limitations and problems related to long photoperiods*, *ISHS Acta Horticulturae: International Symposium on Growing Media and Hydroponics*, 1997, 481, s. 469–474, DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.481.54.
- [53] Demers D.A., Dorais M., Wien C.H., Gosselin A., *Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants and fruit yields*, *Scientia Horticulturae*, 1998, 74, 4, s. 295–306, DOI: 10.1016/S0304-4238(98)00097-1.
- [54] Matsuda R., Yamano T., Murakami K., Fujiwara K., *Effects of spectral distribution and photosynthetic photon flux density for overnight LED light irradiation on tomato seedling growth and leaf injury*, *Scientia Horticulturae*, 2016, 198, s. 363–369, DOI: 10.1016/j.scienta.2015.11.045.
- [55] Forster M.A., *How significant is nocturnal sap flow?*, *Tree Physiology*, 2014, 34, 7, s. 757–765, DOI: 10.1093/treephys/tpu051.
- [56] Caird M.A., Richards J.H., Donovan L.A., *Nighttime Stomatal Conductance and Transpiration in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> Plants*, *Plant Physiology*, 2007, 143, 1, s. 4–10, DOI: 10.1104/ss.106.092940.
- [57] Seluzicki A., Burko Y., Chory J., *Dancing in the dark: darkness as a signal in plants*, *Plant, Cell & Environment*, 2017, 40, 11, s. 2487–2501, DOI:10.1111/pce.12900.
- [58] Arora D., Sagar S., Singh A., *Dark-induced Hormonal Regulation of Plant Growth and Development*, *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11, art. 581666, DOI: 10.3389/fpls.2020.581666.
- [59] Lai A.G., Doherty C.J., Mueller-Roeber B., Kay S.A., Schippers J.H., Schippers J.H.M., Dijkwel P.P., *CIRCADIAN CLOCK-ASSOCIATED 1 regulates ROS homeostasis and oxidative stress responses*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109, 42, s. 17129–17134, DOI:10.1073/pnas.1209148109.
- [60] Kim J A., Kim H.S., Choi S.H., Jang J.Y., Jeong M.J., Lee S.I., *The importance of the circadian clock in regulating plant metabolism*, *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18, 12, art. 2680, DOI: 10.3390/ijms18122680.
- [61] Fricke W., *Night-time transpiration-favouring growth?*, *Trends in Plant Science*, 2019, 24, 4, s. 311–317, DOI: 10.1016/j.tplants.2019.01.007.

## LEAF MORPHOLOGY MODIFICATION OF ACER PSEUDOPLATANUS AND CELASTRUS ORBICULATUS IN RESPONSE TO LIGHT POLLUTION AT NIGHT

**Abstract:** Plants use light as an energy source for photosynthesis. The light is also a signal that regulates the growth and development of plants. Darkness enables the regulation of the biological rhythms of plants. We carried out an experiment, during which one-year-old woody plants (sycamore maple and round-leaved choke) were grown in pots. The plants were placed in natural conditions of day and night (control) and illuminated during the night with an LED lamp (light pollution) in addition, one part of the plants was situated in the greenhouse and the other one – outside the greenhouse. Regardless of the thermal conditions, the light at night significantly reduced the length of the leaf blades. Similarly, the width of the leaf blades was smaller under the influence of night lighting, except for maple leaves growing in the greenhouse. Night illumination stimulated an increase in the thickness of the leaf blades of the studied plants. To sum up, the leaves under the influence of light pollution were smaller but thicker, which will affect the gases' diffusion into their interior.

**Keywords:** photoperiod, light stress, urban trees, leaf area, leaf thickness



# WPŁYW ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM NA FIZJOLOGIĘ PTAKÓW ZAMIESZKUJĄCYCH MIASTA

Krystyna Skwarło-Sońta

Zakład Fizjologii Zwierząt, Wydział Biologii, Uniwersytet Warszawski  
*k.skwarlo-sont@uw.edu.pl*

**Streszczenie:** Globalny postęp urbanizacji jest przyczyną ciągłego wzrostu skażenia światłem, które staje się coraz większą uciążliwością nie tylko dla ludzi, ale także dla pozostałych mieszkańców miasta, tj. flory i fauny. W miarę poznawania szkodliwości skażenia światłem dla zdrowia i funkcjonowania organizmu człowieka, mechanizmy uczestniczące w zakłócaniu rytmów dobowych i syntezy melatoniny przez nocne światła miejskie stają się powoli zrozumiałe. Natomiast w odniesieniu do zwierząt zamieszkujących miasta wiedza ta jest ciągle raczej skromna. Celem niniejszego opracowania jest przegląd istniejących badań dotyczących fizjologii i behawioru ptaków śpiewających zaadaptowanych do życia w skażonych światłem miastach. Aby jednak mieć wgląd w uczestniczące w tym mechanizmy molekularne, przedstawiono także wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych.

**Słowa kluczowe:** skażenie światłem, rytm dobowy, zegar biologiczny, melatonina, ptaki śpiewające

## 1. Wstęp

Postępująca globalna urbanizacja [1], będąca konsekwencją wykładniczego wzrostu liczby mieszkańców naszej planety [2] generuje nowy rodzaj zanieczyszczenia środowiska, ciągle jeszcze pozostający poza powszechną świadomością. Bywa ono niekiedy obiektem protestów lub wręcz wrogości, zwłaszcza, że już nazwa tego problemu, czyli „skażenie światłem” [3], dla większości osób jest trudnym do zaakceptowania wymysłem „zwariowanych ekologów”, bo przecież obecność światła w potocznym pojęciu oznacza jasność, dobro, poczucie bezpieczeństwa. Tymczasem jest to coraz powszechniejszy rodzaj zanieczyszczenia środowiska, związany z nadmiernym i słabo kontrolowanym stosowaniem światła elektrycznego, które

z racji łatwej dostępności zaczyna utrudniać życie coraz większej liczbie mieszkańców naszej planety.

Używając satelitów dostarczających danych o wysokiej rozdzielczości uzyskano pomiary jasności nocnego nieba [4] wskazujące, że znaczna większość światowej populacji, w tym ponad 99% Europejczyków i mieszkańców USA żyje w warunkach skażenia światłem. Droga Mleczna jest niewidoczna dla 1/3 ludzkości, co dotyczy około 60% Europejczyków i 80% obywateli USA. Ponadto 88% Europy i prawie 50% USA doświadcza obecności sztucznego światła w nocy [4], co w dalszej części tego tekstu będzie określane skrótowcem ALAN (ang. *Artificial Light At Night*). ALAN dostarcza oświetlenia, którego natężenie i skład spektralny odbiegają od naturalnego światła w nocy, i dlatego w znacznym stopniu zmienia naturalne warunki świetlne. W skali ewolucyjnej obecność ALAN stanowi nowy czynnik stresowy, dlatego ciągle jeszcze niewiele wiadomo, jak może on wpływać na organizmy, które ewoluowały w stałych cyklach światła i ciemności (L:D).

Od czasu, kiedy astronomowie zauważyli, że obserwacje nocnego nieba stają się coraz trudniejsze mimo postępu w precyzji używanych narzędzi [5], do świadomości „zwykłych śmiertelników” zaczęła bardzo powoli docierać informacja, że problem nie dotyczy jedynie obserwacji astronomicznych. Stało się oczywistym, że przyczyną tych problemów są coraz jaśniejsze noce, rozświetlone sztucznym światłem, zaczęto też zastanawiać się jak szeroki jest zasięg skutków skażenia światłem [6]. Główną przyczyną tych problemów jest nadmiar obiektów oświetlonych w nocy, co natychmiast kieruje nas do miast jako głównego ich źródła. Bo to właśnie życie w mieście nieodmiennie kojarzy się z oświetlonymi ulicami, budynkami użyteczności publicznej, a także podświetlanymi budowlami, które powinny być wyeksponowane także w nocy, aby nadać miastu uroku, dostojności, atrakcyjności [7]. Oczywiście, to nie tylko miasta są sprawcami skażenia światłem, bowiem światłem w nocy posługują się ludzie w różnych miejscach i z różnych powodów, ale konsekwencją jego obecności, niekiedy bardzo słabego i o odmiennych długościach fali, jest prawie zawsze zaburzenie funkcjonowania endogennego zegara biologicznego [8, 9], i niektóre tego konsekwencje będą przedmiotem poniższego tekstu.

## **2. Endogenny zegar biologiczny – zasada działania**

### **2.1. Organizacja czynności organizmu w ciągu doby**

Organizmy zamieszkujące Ziemię są zaadaptowane do panujących tutaj warunków związanych z ruchami naszej planety wokół własnej osi, w następstwie czego mamy dzień i noc, oraz obiegu wokół Słońca, co skutkuje porami roku. Pory roku są mniej lub bardziej wyraźne w zależności od odległości od równika, ale na naszej półkuli północnej grudzień to okres najkrótszych dni (tzw. zimowe przesilenie występuje krótko przed Bożym Narodzeniem) zaś przesilenie letnie to znana w legendach i kulturze ludowej najkrótsza w roku Noc Świętojańska, która ma miejsce 24 czerwca.

Jednak bez względu na porę roku i szerokość geograficzną doba trwa zawsze 24 godziny, w których „musi się zmieścić” dzień i noc, i jest to regularność, od której nie ma odwołania. Organizmy ziemskie „nauczyły się żyć” w tych warunkach, co oznacza, że zaadaptowały swoją fizjologię i behavior do regularnie następujących po sobie jasnych i ciemnych okresów doby, potrafią też antycypować to następstwo. Muszą to robić, bowiem żaden organizm nie jest w stanie funkcjonować nieustannie w takim samym tempie, a ponadto procesy o odwrotnych kierunkach (np. synteza i rozpad, ruch i spoczynek, sen i aktywność) nie mogą odbywać się jednocześnie. Jeśli zaś przewidywanie zmian zewnętrznych pozwala organizmom przygotować się do tego, co nastąpi, to naturalną tego konsekwencją będzie stwierdzenie, że mają one endogenne (pochodzący z nich samych) licznik czasu, dzięki któremu „wiedzą”, kiedy nastąpi przejście nocy w dzień (i odwrotnie).

Z własnego doświadczenia wiemy, że przygotowanie się do nocnego spoczynku wiąże się nie tylko z wywietrzeniem pokoju i zgaszeniem światła, ale wymaga także innych działań, które spowodują, że oczekiwany sen nastąpi szybko i łatwo – np. nie wypijemy napoju energetyzującego czy nie włączymy głośnej muzyki. Podobnie przygotowuje się nasz organizm, nastawiając się na obniżanie tempa metabolizmu skutkującego spadkiem temperatury ciała, zaczyna się wydelać hormon ciemności, czyli melatonina, dominuje aktywność układu przywspółczulnego spowalniającego pracę serca i układu krążenia a pobudzającego procesy trawienia i przyswajania składników odżywczych. Budząc się rano, rejestrujemy nie tylko jasność dnia oraz towarzyszące jej odgłosy i zapachy, ale także czujemy, że nasz organizm staje się gotowy do podjęcia różnych aktywności, zarówno fizycznych jak umysłowych. Mają one największy „napęd” do pory południowego posiłku, po którym następuje krótkotrwałe obniżenie tego potencjału (co kraje południowe przeznaczają na sjęstę, czyli poobiednią drzemkę), ale po południu znowu mamy dobre wskaźniki wydolności fizycznej i umysłowej. Pod wieczór wzrasta m.in. wrażliwość na bodźce smakowe i to jest właśnie pora tradycyjnie odbywanych przyjęć z obfitymi posiłkami – nie wiemy nawet, że taki obyczaj dyktuje nasz wewnętrzny zegar biologiczny! Uprzedzając pytania dotyczące mechanizmu zegarowego w związku z nagrodzeniem tych badań Nagrodą Nobla w roku 2017, odsyłam Czytelnika na stronę internetową Komitetu Noblowskiego, objaśniającego szczegóły czasowego uporządkowania procesów fizjologicznych, nie tylko w organizmie człowieka [10].

## **2.2. Lokalizacja zegara biologicznego w organizmie kręgowca**

Gdzie zatem w naszym organizmie znajduje się ten zegar, który tak precyzyjnie porządkuje nasze czynności życiowe? I czy tylko jeden mechanizm wystarczy, aby objąć swoją kontrolą wszystkie procesy fizjologiczne i behavior? Od czasu naukowego opisanie zegara biologicznego w latach 50. ubiegłego wieku zaczęła się bardzo dynamicznie rozwijać nowa dyscyplina fizjologii, chronobiologia, która zajmuje się czasowym uporządkowaniem procesów biologicznych w organizmie i mechanizmami w to zaangażowanymi. W ciągu kolejnych lat mechanizmy poznawano coraz lepiej,

również na poziomie molekularnym i niebawem stało się jasne, że system jest bardziej złożony, niż się pierwotnie wydawało, ale także ujawniła się jego uniwersalność.

Wykrycie i lokalizacja w ośrodkowym układzie nerwowym (OUN) mechanizmu porządkującego aktywność wielu procesów fizjologicznych w ciągu doby sugerowała, że jest to mechanizm nadrzędny, zawiadujący całą fizjologią i behawiorem zwierzęcia – także człowieka. Jest nim centralny zegar biologiczny (ang. *master clock*), mieszczący się w jądrach nadskrzyżowaniowych podwzgórza, na którego określenie powszechnie używany jest skrótowiec SCN, pochodzący od łacińskiej nazwy tych struktur, wprowadzonej do języka angielskiego. Szybko jednak okazało się, że nie jest to jedyny mechanizm zegarowy funkcjonujący w organizmie kręgowca (na potrzeby tego opracowania ograniczę się do omówienia mechanizmów zegarowych tej grupy zwierząt, zaś czytelnikom zainteresowanym bardziej szczegółowym opisem molekularnych mechanizmów zegarowych polecam istniejące artykuły przeglądowe, także w języku polskim [11–15]). Oprócz zegara centralnego zidentyfikowano zegary obwodowe (peryferyczne), które mieszczą się w wielu narządach, zwłaszcza związanych z układem pokarmowym i to one dostosowują ich czynność do „wytycznych”, pochodzących z SCN, ale także do aktualnej sytuacji metabolicznej danego narządu [16, 17].

Kiedy poznano mechanizm molekularny zegara biologicznego to okazało się, że jest on uniwersalny w całym świecie zwierzęcym. Co to znaczy? Uniwersalność mechanizmu zegarowego sprowadza się do powszechnej zasady sekwencyjnego działania elementów stymulujących i hamujących transkrypcję grupy genów, zwanych genami zegarowymi. Transkrybowane w ciągu dnia elementy pozytywne (*Clock* i *Bmal*) aktywują transkrypcję innej pary genów (*Per* i *Cry*), działających jako elementy negatywne, których białkowe produkty nagromadzają się w nocy i wyłączają rano kompleks *Clock/Bmal*. Mechanizm taki, z niewielkimi modyfikacjami na poziomie struktury poszczególnych genów zegarowych, występuje u wszystkich zwierząt i za jego rozszyfrowanie została w 2017 roku przyznana Nagroda Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny [10]. Tego radosnego dla chronobiologii wydarzenia także nie będę tutaj rozwijać, bo z tej okazji pojawiło się wiele artykułów, zajmujących się tymi mechanizmami bardziej lub mniej szczegółowo [18]. Chcę jedynie zwrócić uwagę, że rytmiczną w ciągu doby ekspresję wykazano w ponad 30% genów funkcjonujących w organizmie ssaka, co oznacza, że „zegary peryferyczne” występują w znacznej liczbie narządów wewnętrznych i działają na tej samej zasadzie, co zegar centralny. Są one także połączone funkcjonalnie między sobą i zwrotnie z zegarem centralnym, dzięki czemu procesy fizjologiczne są ze sobą sprzężone (czyli zsynchronizowane), są także dostosowane do warunków świetlnych aktualnie panujących w środowisku [16, 17].

### 2.3. Dawcy czasu dla zegara biologicznego

Skąd jednak nasze zegary „wiedzą” o tym, co się dzieje w środowisku? Mimo swej endogenności muszą dostawać najważniejsze informacje, które pozwolą na dostosowanie poszczególnych procesów do warunków zewnętrznych (synchronizację – to określenie pojawia się już po raz drugi, i do niego jeszcze wrócimy w dalszej części tego rozdziału). Takie informacje nazywamy „dawcami czasu”, w chronobiologii określanymi jako *Zeitgeber* – niemiecki termin wprowadzony do nauki światowej w uznaniu zasług wybitnego uczonego niemieckiego Jürgena Aschoffa (1913–1998), jednego z „ojców chronobiologii”, który stworzył podwaliny eksperymentalnego badania zegara biologicznego.

Dla zegara centralnego, czyli SCN, połączonego drogami nerwowymi z siatkówką oka, dawcą czasu są aktualne warunki świetlne środowiska, czyli obecność lub brak światła [11, 13]. One dostosowują aktywność elektryczną neuronów SCN i transkrypcję genów zegarowych w taki sposób, że kontrolowane przez nie struktury zarówno OUN, jak i narządów obwodowych są aktywne zgodnie z potrzebami środowiskowymi (idziemy spać lub podejmujemy aktywność). Zegary obwodowe nie mają takiego połączenia ze światem zewnętrznym, zatem muszą odbierać informację od innych dawców czasu – dla nich główny *Zeitgeber* to pokarm: jego dostępność, skład, ilość [16, 17]. Ponieważ jednak pory pobierania posiłków (poza laboratoryjnymi układami doświadczalnymi, kiedy zwierzęta mają dostępność pokarmu ograniczoną lub regulowaną) są najczęściej związane z warunkami świetlnymi otoczenia, nie można wykluczyć wzajemnego oddziaływania obu tych czynników, koniecznych dla pełnej synchronizacji funkcji organizmu. Zaś konsekwencje tego widoczne są najlepiej w warunkach skażenia światłem, kiedy pojawia się ono w niewłaściwej porze, będąc „fałszywym dawcą czasu” zarówno dla SCN, jak i „wprowadzając w błąd” zegary obwodowe przez np. zmienione pory pobierania pokarmu, co ma poważne konsekwencje na poziomie regulacji metabolizmu [8, 9].

### 3. Szyszynka i melatonina – zegar i kalendarz organizmu

Oprócz receptorów odpowiedzialnych za widzenie (powszechnie znane czopki i pręciki), siatkówka oka kręgowca zawiera także niewielką, ale ogromnie istotną, liczbę tzw. komórek zwojowych, będących fotoreceptorami niezwiązanymi z widzeniem. Komórki zwojowe zawierają melanopsynę, barwnik wrażliwy na światło, zwłaszcza na niebieskie o długości fali z zakresu 460–480 nm [19], a ich wypustki tworzą pozawzrokową drogę nerwową, tzw. trakt siatkówkowo-podwzgórzowy (RHT), prowadzący bezpośrednio do SCN, a więc do centralnego zegara biologicznego organizmu. Zegar zostaje tą drogą poinformowany o warunkach świetlnych panujących na zewnątrz – ale należy jeszcze powiadomić o tym inne narządy! Następnym etapem jest zatem skierowanie tej informacji do szyszynki, nieparzystego gruczołu neuroendokrynowego położonego w dnie III. komory mózgu, odpowiedzialnego za syntezę melatoniny, hormonu ciemności zwanego też „biochemicznym



substratem ciemności”. Takie określenie oznacza, że melatonina powstająca w szyszynce tylko w nocy i natychmiast przekazywana do krwi, przenosi do wszystkich komórek organizmu informację o panującej ciemności. Z tego względu melatoninę nazywamy również „zegarem organizmu”, ponieważ jej obecność oznacza dla komórek ciemną fazę doby, czyli noc, a wzrost lub zmniejszanie się jej syntezy wskazuje odpowiednio na początek nocy lub zbliżający się jej koniec [20, 21].

W warunkach naturalnego oświetlenia (czyli pochodzącego wyłącznie od Słońca, księżyca i gwiazd) długość nocy zależy od pory roku – dotyczy to zwłaszcza strefy klimatu umiarkowanego. Dłuższa lub krótsza noc wyznacza odpowiednie okresy syntezy melatoniny w szyszynce, wskazujące komórkom i narządom organizmu, że oto osobnik znajduje się w konkretnej porze roku – na półkuli północnej wydłużająca się noc oznacza zbliżającą się zimę, wraz z wszelkimi tego konsekwencjami płynącymi dla zwierząt dziko żyjących. Jest to najważniejszy sygnał środowiskowy regulujący aktywność rozrodczą tych zwierząt, bowiem w ślad za nim idą warunki sprzyjające (lub nie) wydaniu potomstwa i możliwości jego odchowania (temperatura, pokarm, kryjówki itd.). Ponieważ receptory melatoniny znajdują się na wszystkich poziomach osi podwzgórzowo-przysadkowo-gonadowej, powstająca w szyszynce, melatonina może działać również jako „kalendarz organizmu”, co ujawnia jej kolejną ważną funkcję regulacyjną [22, 23].

To wszystko świetnie funkcjonuje w warunkach niczym niezakłóconej ciemności nocnej – przedmiotem naszych rozważań ma być jednak wpływ skażenia światłem i ALAN na życie mieszkańców miast, wśród których znajdują się nie tylko ludzie, ale także fauna i flora, będące stałym elementem struktury miasta [24]. Jak już bowiem wspomniano – fotoreceptory melanopsynowe są najbardziej wrażliwe na obecność światła niebieskiego, które z kolei staje się nieodłączną składową nocnego oświetlenia miast, pochodzącego z zewnętrznych opraw oświetleniowych, zwłaszcza niskokosztowych źródeł światła niebieskiego w technologii LED<sup>1</sup>, coraz powszechniej instalowanych do oświetlania obiektów, nie tylko w miastach. Oznacza to, że obecność światła w nocnym mieście odbierana jest przez jego mieszkańców, do których należą m.in. ptaki śpiewające, które będą analizowane w dalszej części tego opracowania.

### 3.1. Wpływ ALAN na aktywność szyszynki – wyniki badań laboratoryjnych

Od kiedy zorientowano się, że obecność światła w nocy może niekorzystnie wpływać na naturalny rytm dobowy syntezy melatoniny w szyszynce [25, 26], pojawiają się coraz liczniejsze badania eksperymentalne, których celem jest poznanie mechanizmów związanych z desynchronizacją zegara biologicznego przez ALAN i jego konsekwencji dla organizmów poddanych takim działaniom. Zaletą tych badań jest możliwość precyzyjnego kontrolowania warunków, obejmujących intensywność i czas ekspozycji zwierząt doświadczalnych na ALAN, a także wybór badanych wskaźników

---

<sup>1</sup> LED – ang. *Light Emitting Diodes*.

i metody oceny ich zmian. Najczęstsze są doświadczenia prowadzone na modelowych organizmach w badaniach immunologicznych, jakimi są różne szczepy myszy, dla których istnieje mnóstwo bardzo precyzyjnych metod analitycznych, często niedostępnych dla innych gatunków zwierząt.

Przedstawię przykładowe wyniki bloku bardzo zaawansowanych metodycznie doświadczeń, pochodzących z jednego ośrodka badawczego (Uniwersytet w Hajfie, Izrael), dotyczących oceny wpływu ALAN na mechanizmy związane z rozwojem nowotworu gruczołu sutkowego. O tym nowotworze wiadomo, że występuje ze statystycznie większą częstotliwością u kobiet pracujących w systemie zmianowym, będącym jedną z form ekspozycji na ALAN [27, 28, 29, 30]. Badano w nich samice myszy z przeszczepioną linią komórkową 4T1 ludzkiego raka piersi, poddawane ekspozycji na nocne oświetlenie w różnych kombinacjach (barwa światła, dodatkowe podawanie melatoniny) na aktywność szyszynki i rozwój guza. Okazało się, że nocna ekspozycja na niebieskie światło LED stymulowała wzrost nowotworu i jego przerzuty do innych narządów, skorelowane z obniżeniem zawartości 6-SMT<sup>2</sup> w moczu. Natomiast podawanie melatoniny w wodzie pitnej odwracało skutki działania ALAN, prowadząc do wniosku, że zahamowana pod wpływem ALAN synteza melatoniny ułatwia proliferację komórek raka piersi, podczas gdy w warunkach normalnej nocnej syntezy melatoniny następuje wyciszenie rozwoju nowotworu.

Podobne ochronne działanie melatoniny uzyskiwali inni badacze [31] w przypadku nowotworu gruczołu piersiowego indukowanego u myszy chemicznie. Wówczas obecność ALAN także stymulowała wzrost guza, powodowała desynchronizację rytmu dobowego i zmniejszała przeżywalność badanych zwierząt. Przedstawione wyniki badań wskazują na ścisłe powiązanie między skażeniem światłem a rozwojem raka piersi, a te niekorzystne efekty można cofnąć przywracając właściwy poziom melatoniny w organizmie.

Wybrane przykłady badań doświadczalnych pokazują, że problem skażenia światłem jest w istocie poważniejszy, niż by się to mogło wydawać osobom zafascynowanym pożytkami płynącymi z nieograniczonego dostępu do sztucznego oświetlenia w dowolnych ilościach i czasie [6]. Jednym z poważniejszych zastrzeżeń, jakie można postawić tak zaplanowanym doświadczeniom jest jednak fakt, że modelowe gatunki myszy są zwierzętami o nocnym wzorcu aktywności ruchowej. Chociaż u wszystkich kręgowców melatonina jest hormonem ciemności, to pozostałe mechanizmy regulacyjne są jednak zróżnicowane w zależności od „interpretacji” informacji o dniu i nocy, a te są zdecydowanie różne u gatunku dziennego (człowiek) i nocnego (myszy) [32].

Przytoczone przykłady wskazują jednoznacznie, że bez względu na przyjęty model badań, skażenie światłem wywołuje różnorodne, ale zawsze szkodliwe, efekty

---

<sup>2</sup> 6-SMT – skrót określający nazwę metabolitu (siarczanu) melatoniny, którego oznaczenie w moczu jest jednym ze sposobów oceny aktywności biosyntetycznej szyszynki. Spadek poziomu tego związku w opisywanym układzie doświadczalnym wskazuje na zahamowanie syntezy melatoniny, będące wynikiem działania ALAN.

w fizjologii osobników poddanych temu działaniu. U podstaw zakłóconych procesów leżą różne modyfikacje funkcji zegara endogennego i jak się wydaje – najczęściej podstawowym skutkiem jest zakłócenie syntezy melatoniny szyszynkowej z wszystkimi tego następstwami. Czas zatem przyjrzeć się działaniu ALAN obecnego w miastach na innych, niż ludzie, mieszkańców i zobaczyć, jak dalece mogą się oni zaadaptować do okoliczności, wymuszonych przez człowieka.

## 4. Światła miast i ich wpływ na ptaki

### 4.1. Urbanizacja jako czynnik modyfikujący behavior i fizjologię ptaków

Urbanizacja to nie tylko zajmowanie terenów, będących dotychczas naturalnym siedliskiem wielu gatunków roślin i zwierząt, ale także stawianie przed fauną i florą nowych wymagań, którym sprostanie stanowi warunek adaptacji do życia w mieście. Choć niektóre gatunki opuszczą tereny zurbanizowane, to te, które dobrze sobie tam radzą, muszą wykazywać cechy adaptacji do wymagań środowiska miejskiego. I tym właśnie zaadaptowanym gatunkom ptaków przyjrzymy się w dalszej części tekstu, zwracając uwagę na te czynności życiowe i mechanizmy, które wymagają dostosowania się do oświetlonych nocą miast.

Zespół pracujący pod kierunkiem nieżyjącego wybitnego niemieckiego ekofizjologa ptaków Eberharda Gwinnera, już w pracy opublikowanej w 2005 roku zwracał uwagę na przyspieszenie nawet do trzech tygodni sezonu rozrodczego kosów *Turdus merula* zamieszkujących miasta, w porównaniu do osobników pochodzących z terenów leśnych [33]. Jako czynniki środowiskowe mające wpływ na przyspieszone dojrzewanie funkcjonujących sezonowo gonad brano pod uwagę obecność sztucznego światła, ale także mikroklimat miejski, zwiększoną antropogenną podaż pokarmu czy oddziaływania socjalne – za szczególnie ważne uznano zwłaszcza te dwa ostatnie czynniki. Takie podejście wybitnego znawcy fizjologii ptaków wskazuje jednoznacznie, że rola zanieczyszczenia światłem rozpoznawana jest powoli i nabrała przyspieszenia w ostatnich latach. Warto jednak dodać, że efekt sztucznego oświetlenia miasta został zaproponowany dla wytłumaczenia przyspieszonego wiosennego rozrodu londyńskich szpaków już w roku 1938 [34] (cyt. za [35]).

O tym, że duże miasto z jego przemysłem generującym zanieczyszczenie środowiska, może wpływać również na aktywność biosyntetyczną szyszynki ptaków, przekonali się już dość dawno temu (publikacja z roku 2007) rodzimi fizjologowie, badający pisklęta bocianów gniazdujących w pobliżu uprzemysłowionego miasta – Zielonej Góry [36]. Wprawdzie punktem wyjścia było szukanie wpływu przemysłowego zanieczyszczenia powietrza cząstkami w nim zawieszonymi, ale analiza poziomu melatoniny w krwi tych ptaków w dzień i w nocy ujawniła, że następuje zakłócenie rytmu dobowego funkcji szyszynki. W porównaniu z wartościami stwierdzonymi u ptaków gniazdujących w odległej wsi, poziom melatoniny mierzony w dzień był istotnie wyższy, zaś nocą znacznie obniżony, wskazując jednoznacznie, że

światła dużego miasta są tym czynnikiem, który wpływa na zwierzęta mieszkające w jego pobliżu. Bociany nie są ptakami zakładającymi gniazda w obrębie dużych miast, ale dla właściwej nawigacji podczas przelotów na duże odległości potrzebują prawidłowego funkcjonowania szyszynki, która u ptaków razem z SCN i siatkówką stanowi miejsce lokalizacji centralnego zegara biologicznego [12]. Istnieją liczne dowody wskazujące na dramatycznie negatywny wpływ sztucznego oświetlenia na migracje ptaków [37].

## 4.2. Adaptacje procesów rozrodczych ptaków zamieszkujących miasta

### 4.2.1. Obserwacje terenowe

Wiele gatunków ptaków stanowi stały element ekosystemu dużych miast, pozostającego pod wpływem wszystkich działających tam czynników. Skażenie światłem spowodowane nocnym oświetlaniem obiektów jest wspomnianym na początku nieodłącznym atrybutem życia w mieście, obserwacje ptaków są więc bardzo cennym źródłem wiedzy o tym, co nocne światła mogą zmienić w ich fizjologii i behawiorze. Są to w większości gatunki o aktywności dziennej, będąc znacznie dogodniejszym modelem do porównywania wpływu ALAN na fizjologię człowieka niż gryzonie laboratoryjne o nocnym trybie aktywności ruchowej. Ponadto obserwacje behawioru ptaków śpiewających i jego modyfikacji pozwalają na wnioskowanie o wpływie ALAN na czasowe uporządkowanie procesów fizjologicznych bez stwarzania sztucznych układów doświadczalnych, ingerujących w naturalną organizację zegara biologicznego. Jednakże wyjaśnienie mechanizmów zaangażowanych w obserwowane efekty nie będzie możliwe bez starannie kontrolowanych układów doświadczalnych, do czego odwołano się w dalszej części tekstu.

W tym miejscu trzeba jednak przywołać wyniki pomiarów dokonanych „we współpracy” z samcami kosów zamieszkujących obszary dużego miasta (centrum komercyjne i park miejski) oraz ich odpowiednikami „wiejskimi”. Ptaki wyposażano w miniaturowe czujniki, rejestrujące telemetrycznie zarówno ekspozycję na światło jak i aktywność ruchową w ciągu doby [38]. Celem tych badań było zmierzenie, w jakich warunkach oświetleniowych kosy pozostają w mieście przez cały rok i ich porównanie z ptakami „wiejskimi”. Ku najwyższemu zdumieniu badaczy okazało się, że „miejskie” kosy najwyraźniej unikają źródeł światła, bowiem światło zmierzone przez ich czujniki (0,3 lx) było około 20-krotnie słabsze niż to, które emitują miejskie zewnętrzne oprawy oświetleniowe.

Aktywność dobową ptaków miejskich zaczynała się wcześniej niż na wsi, ale kończyła w czasie porównywalnym, na co miały wyraźny wpływ sezon (większa aktywność na początku sezonu rozrodczego) i warunki pogodowe. Natomiast dzień tygodnia – a więc porównanie „weekend vs dni robocze”, generujące różnice w poziomie hałasu, nie miało wpływu na rytm dobowy ruchliwości kosów. To są bardzo cenne dane pomiarowe, wskazujące na dominujący udział światła miejskich

w kształtowaniu rytmu aktywności lokomotorycznej ptaków zamieszkujących miasta. Ponadto pokazują, jak niewielkie intensywności nocnego oświetlenia modyfikują aktywność okołodobową ptaków, nawet jeśli mogą skutecznie unikać jasnego oświetlenia. Badania eksperymentalne tego i innych zespołów dotyczące fizjologii i behawioru rozrodczego miejskich ptaków śpiewających wykorzystujące wyniki tych pomiarów [38] będą omówione w dalszej części opracowania.

Okołodobowa aktywność samców ptaków śpiewających jest stosunkowo najłatwiej wyrażającym się wskaźnikiem sezonowych zmian cykli rozrodczych. Poranne śpiewy samców, np. ptaków wróblowatych, wskazują na jakość rozrodczą śpiewającego osobnika, niekiedy umożliwiając mu zdobycie dodatkowej partnerki do kopulacji, czyli skutecznej troski o propagowanie własnego materiału genetycznego [39]. Rozmnażanie jest procesem wymagającym z jednej strony przedłużonego w czasie przygotowywania organizmów rodzicielskich, z drugiej zaś takiej synchronizacji aktywności reprodukcyjnej, aby potomstwo pojawiło się w warunkach optymalnych, zwłaszcza pod względem dostępności pożywienia. Sygnały środowiskowe muszą być wystarczająco czytelne i pojawiać się z tak dużym wyprzedzeniem, aby sekwencja procesów regulowanych neuroendokrynowo zdążyła się odbyć we właściwym czasie, doprowadziła do rozwoju gonad i wyzwolenia behawioru rozrodczego. Dziko żyjące ptaki strefy umiarkowanej wykorzystują do tej synchronizacji zmieniający się sezonowo fotoperiod, służący jako jednoznaczny sygnał środowiskowy, regulujący czynność gonad [33].

Starannie kontrolowany układ doświadczalny pozwolił uznać obecność sztucznego światła w nocy za czynnik dominujący w przyspieszaniu gotowości rozrodczej samców, wyrażający się wczesnym podejmowaniem śpiewów porannych [39]. Spośród badanych gatunków (zięba zwyczajna *Fringilla coelebs* – modraszka zwyczajna *Cyanistes caeruleus* – sikora bogatka *Parus major* – kos *Turdus merula* – rudzik *Erithacus rubecula*) największe przyspieszenie podejmowania śpiewów porannych (w porównaniu z osobnikami zasiedlającymi obszary odległe od sztucznego światła) występowało u rudzika, który również w naturze zaczyna śpiewać najwcześniej w stosunku do wschodu słońca. W tych samych warunkach terenowych rejestrowano przez siedem lat behawior rozrodczy modraszek zamieszkującej różne tereny miejskie (z dala lub w bliskości światła ulicznych) i porównywano z odpowiednikami żyjącymi w lesie. Samice z terenów objętych światłami ulicznymi zaczynały składać jajka średnio o 1,5 dnia wcześniej, a samce z tych okolic były dwukrotnie skuteczniejsze w zdobyciu dodatkowych partnerek kopulacyjnych niż samce z lasu lub sąsiedzi żyjący w mieście, ale z dala od nocnych światła. Efekt był widoczny we wszystkich grupach wiekowych, ale najwyraźniejszy sukces odnosiły samce roczne. Oznacza to, że skażenie światłem ma istotny wpływ na podejmowanie behawioru rozrodczego i osobniczy wzorzec kopulacyjny, z nie zawsze najlepszymi partnerami (najmłodsze samce). Zaś wcześniejsze sezonowo podejmowanie aktywności rozrodczej może mieć poważne długoterminowe konsekwencje, prowadzące do rozbieżności w czasie potrzeb piskląt pojawiających się zbyt wcześnie a dostępnością pokarmu [39].

Uzupełnieniem tak zdobytej wiedzy są badania innego zespołu [40], który w dwóch kolejnych sezonach rozrodczych manipulował cyklicznie obecnością światła w nocy w kilku naturalnie niezakłócanych fragmentach lasów. Stwierdzono, że samce wszystkich tradycyjnie badanych gatunków ptaków wróblowatych (rudzik, sikora modraszka, sikora bogatka i kos) natychmiastowo i odwracalnie dopasowywały początek swoich porannych śpiewów do obecności ALAN. Najsilniejszy efekt przyspieszający był u rudzika europejskiego, a stosunkowo niewielki u sikory modraszki, sikory bogatki i kosa. Obserwowane zależności wydają się wskazywać na istnienie plastyczności behawioralnej, u podstaw której może leżeć albo długotrwałe przebywanie w skażonych światłem obszarach miejskich albo używanie behawioru kompensacyjnego, takiego jak unikanie światła [40].

#### 4.2.2. Eksperymentalne poszukiwanie mechanizmów adaptacyjnych u ptaków zamieszkujących miasta

Posługując się wspomnianą powyżej wiedzą o ekspozycji na ALAN ptaków mieszkających w miastach [38], kilka ośrodków europejskich podjęło badania eksperymentalne zmierzające do wyjaśniania mechanizmów, zaangażowanych w modyfikację behawioru ptaków, zaadaptowanych do tych warunków.

Cykl badań prowadzonych na kosach [35, 38, 41, 42] dotyczył porównania wpływu oświetlenia nocnego o bardzo niskim natężeniu (0,3 lx) i całkowicie ciemnej nocy na aktywność lokomotoryczną, oraz gotowość rozrodczą, wyrażoną stanem gonad, pierzeniem się i poziomem testosteronu, a w części badań oznaczano także rytm dobowy melatoniny w osoczu. W warunkach laboratoryjnych poddawano takim badaniom samce kosów odłowionych w mieście oraz osobniki pochodzące z terenów wiejskich, aby ocenić czy adaptacja do warunków miejskich znajdzie wyraz w reakcji na obecność ALAN. Okazało się, że samce „miejskie” dojrzewały i pierzyły się miesiąc wcześniej niż „wiejskie” [41]. Obecność ALAN powodowała obniżenie stężenia melatoniny (z różnicami sezonowymi) zaś aktywność ruchowa była wówczas wyższa i gwałtownie wzrastała przed świtem, korelując ze spadkiem stężenia melatoniny [42]. Miejskie i wiejskie ptaki odpowiadały na ALAN tak samo spadkiem syntezy melatoniny, ale różniły się behawiorem: wiejskie były bardziej aktywne niż miejskie, czyli pozostające w warunkach skażenia światłem, co wskazuje na zmianę fenotypu fizjologicznego w warunkach urbanizacji. Jednoznacznym wnioskiem z tych doświadczeń jest hamowanie nocnej syntezy melatoniny jako potencjalny mechanizm fizjologiczny leżący u podstaw przyspieszonego początku aktywności porannej u ptaków miejskich [42].

Kiedy te badania przedłużono na drugi rok [35], u samców kosów przetrzymywanych nadal w warunkach słabego światła w nocy układ rozrodczy nie rozwinął się: zarówno wielkość jąder, jak i stężenie testosteronu pozostawały na poziomie podstawowym u wszystkich osobników, bez względu na pochodzenie z warunków miejskich czy z terenów wiejskich. Natomiast aktywność lokomotoryczna była nadal zsynchronizowana z normalnymi cyklami dzień/noc. Autorzy nie wskazują

jednoznacznych przyczyn, dla których przedłużające się pozostawanie samców kosów w warunkach słabego ALAN wpłynęło na całkowite zahamowanie aktywności rozrodczej, ale postulują zablokowanie w stanie fotorefrakcyjnym, będącym naturalnym, acz odwracalnym procesem fizjologicznym u sezonowo rozmnażających się gatunków, kiedy po okresie zimowego „spoczynku” zwiększająca się długość dnia powoduje aktywację gonad [43, 44]. Nie jest też wykluczone, że pozostając pod wpływem słabego, ale nie dającego się uniknąć światła w nocy, ptaki doświadczały tak silnego chronicznego stresu, że procesy reprodukcyjne zostały całkowicie zablokowane [35].

Wykorzystując wiedzę o wartościach natężenia oświetlenia w porze nocnej, z którymi mają kontakt ptaki w mieście, kolejni badacze określali „zależność od dawki” czyli od stopniowanego słabego natężenia oświetlenia nocnego na rytm dobowy aktywności samców sikory bogatki, łącznie z syntezą melatoniny jako czynnika odpowiedzialnego za synchronizację rytmów dobowych [45]. W warunkach laboratoryjnych eksponowano ptaki na oświetlenie, którego natężenie regulowano w zakresie od 0,005 lx do 5 lx. Eksperyment przeprowadzono dla pięciu różnych wartości natężenia oświetlenia, które odpowiadają typowym poziomom natężenia oświetlenia w nocy w pobliżu opraw oświetleniowych instalowanych w większości obszarów wiejskich Europy Płn., poczynając do najniższych wartości zmierzonych przez kosy noszące czujniki światła w doświadczeniach grupy Dominoniego [38].

Początek porannej aktywności ruchowej był coraz wcześniejszy, a koniec opóźniony w funkcji rosnącej intensywności światła, która wpływała także na coraz większe hamowanie syntezy melatoniny, czemu towarzyszył wzrost nocnej aktywności lokomotorycznej. Te pionierskie badania laboratoryjne sugerują konieczność podjęcia obserwacji w naturalnych warunkach terenowych, w których wpływy ALAN mogą być ograniczone, ponieważ intensywność oświetlenia obniża się gwałtownie w miarę wzrostu odległości od źródeł światła, których ptaki mogą unikać [45].

#### 4.2.3. Przypuszczalne mechanizmy zaangażowane w adaptację ptaków do życia w miejskim skażeniu światłem

Ponieważ ALAN wywiera silny wpływ na behawior i fizjologię ptaków, co skutkuje wcześniejszym rozpoczynaniem śpiewów porannych nawet pod wpływem słabego światła w nocy, to postuluje się działanie dwóch alternatywnych mechanizmów: albo obecność ALAN wpływa na kontrolę aktywności przez zegar, albo zmiana aktywności może być bezpośrednią reakcją na światło (efekt maskujący światła), bez angażowania systemu zegarowego. W kolejnej pracy [46] testowano te hipotezy, badając czy przyspieszony przez słabe nocne oświetlenie (DimALAN) początek porannej aktywności ruchowej sikory bogatki jest związany z przesunięciem fazy zegara. Ptaki były trzymane w warunkach jasnego dnia i ciemnej nocy (LD) i w porównywalnym reżimie LDim przez sześć nocy, a zastosowane warunki Dim w zakresie 0,15 do 5,0 lx

wywoływały przyspieszenie porannej aktywności proporcjonalne do natężenia oświetlenia. Następnie przenoszono je do stałej ciemności (DD), co jest stosowanym w chronobiologii sposobem sprawdzenia kontroli przebiegu badanego procesu przez endogenny zegar biologiczny. Okazało się, że początek aktywności ptaków w warunkach DD był niezależny od tego, w jakich warunkach (LD czy LDim) były trzymane wcześniej, co oznacza, że przyspieszenie dobowej aktywności w warunkach miejskiego DimALAN jest skutkiem bezpośredniego wpływu światła, a nie przesunięcia fazy rytmu [46].

Potwierdzenia takich sugestii dostarczyły najnowsze badania przeprowadzone na zeberkach *Taeniopygia gutatta* przetrzymywanych w DimALAN (1,5 lx) przez dziesięć nocy, u których mierzono aktywność ruchową i dobowe zmiany transkrypcji pięciu genów zegarowych oraz stężenie melatoniny w osoczu [47]. W tych warunkach aktywność ruchowa wzrastała bardzo, natomiast badane wskaźniki funkcji zegara centralnego (rytm dobowy transkrypcji genów zegarowych w mózgu oraz stężenia melatoniny w krwi) i obwodowego (geny zegarowe w wątrobie) nie ulegały zmianie w warunkach DimALAN. Oznacza to, że DimALAN zmienia behavior i fizjologię bez wpływu na funkcjonowanie molekularnego zegara – zarówno centralnego, jak i obwodowego – oraz rytm syntezy melatoniny.

Wyniki te można w pewnym zakresie porównywać z badaniami prowadzonymi na pisklętach kury domowej *Gallus domesticus*, przetrzymywanych od wyklucia przez 12 dni w warunkach fotoperiodu odpowiadającego sezonowi wyklucia (długi lub krótki dzień) lub w ciągłym świetle (LL), u których badano rytm dobowy ekspresji genów zegarowych w szyszynce [48], będącej u ptaków składową zegara centralnego [12]. Wprawdzie natężenie oświetlenia miało znaczną wartość (250 lx), ale nie znosiło rytmu ekspresji badanych genów, w większości przypadków powodując zmniejszenie jego amplitudy. Melatonina podawana w wodzie pitnej nie korygowała rytmów badanych genów, ale powodowała zmianę behavioru, czyli sprawiała, że kurczęta zapadały w sen porównywalny z obserwowanym w warunkach ciemnej nocy.

Opisywane w cytowanym piśmiennictwie badane gatunki ptaków dziko żyjących były dojrzałe płciowo, więc też i mechanizmy regulacyjne mogły być wykształcone inaczej niż u nowowyklutych piskląt kury domowej, ale pewne wspólne zależności dają się zauważyć. Warunki LL w laboratoryjnych badaniach kurcząt, mogące częściowo odpowiadać ALAN w naturze, pokazują, że zegar endogeny jest częściowo zdesynchronizowany a traktowanie melatoniną modyfikuje behavior i tylko nieznacznie przywraca synchronizację zegara szyszynkowego. Reasumując – można się spodziewać, że mechanizmy zaangażowane w adaptacje ptaków miejskich do skażenia światłem nie polegają wyłącznie na zaburzeniu kontroli przez zegar ani nie są wyłącznie maskującym efektem działania światła. Jednak zawsze, kiedy to badano – nocna synteza melatoniny była zmniejszona pod wpływem ALAN.

W porównaniu z poznawaniem aspektów molekularnych regulacji rytmów dobowych ludzi czy gryzoni laboratoryjnych [50], analogiczna wiedza dotycząca behavioru ptaków zaadaptowanych do warunków miejskiego skażenia światłem jest znacznie uboższa. Zwłaszcza brak w tym obszarze doniesień uwzględniających



mechanizmy epigenetyczne, odwołujące się do odwracalności takich procesów jak metylacja DNA, modyfikacje histonów czy skracanie telomerów, które mogą skutkować zarówno wyciszeniem jak reaktywacją transkrypcji poszczególnych genów [49]. Warto jednak zwrócić uwagę, że dodatkowe informacje dotyczące roli metylacji DNA w dobowej organizacji procesów biologicznych uzyskano dzięki badaniom nad skażeniem światłem [51].

W znakomitym opracowaniu przeglądowym [49] Rüdiger Hardeland odwołuje się m.in. do publikacji dotyczących pracowników zmianowych, u których wykryto częste hiper- i hipometylacje DNA, świadczące o wyłączeniu i włączaniu transkrypcji licznych genów, także genów zegarowych. Niewielkie zmiany cyklu światło–ciemność powodują w centralnym zegarze biologicznym myszy zmiany metylacji DNA, które są odwracane w naturalnych cyklach świetlnych zaś inhibitory metylotransferazy DNA blokują powrót do stanu wyjściowego. Wydaje się, iż SCN wykorzystuje metylację promotorów do adaptowania swojej cykliczności do środowiska, czyli do plastyczności cykli dobowych [49] – gdybyśmy mieli wyniki podobnych badań na ptakach, to interpretacja obserwowanych zależności byłaby znacznie łatwiejsza.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Zarówno obserwacje ptaków zamieszkujących miasta, jak i doświadczalnie stwarzane warunki odpowiadające mającemu tam miejsce skażeniu światłem pokazują, że niektóre gatunki wykazują zdolność adaptacji do wymuszonych przez człowieka zmian w ich naturalnym środowisku. Najłatwiej zauważalną zmianą jest wcześniejsze rozpoczynanie śpiewów porannych, które koreluje z modyfikacjami behawioru rozrodczego a w konsekwencji – zmienionymi porami składania jaj i przyspieszonym pojawianiem się piskląt. Grozi to „rozminięciem się w czasie” optymalnych warunków do wykarmienia potomstwa, ale nie można wykluczyć, że będzie to dotyczyć także takich istotnych czynników środowiskowych jak temperatura, dostępność kryjówek czy obecność drapieżników, także mających duże znaczenie podczas wychowywania potomstwa.

Z drugiej jednak strony – wydaje się, że gatunki zaadaptowane do życia w mieście potrafią sobie radzić z wszechobecnością światła, najwyraźniej unikając nadmiernego przebywania w jego obecności, o czym mogą świadczyć zarówno badania ze stopniowaniem wielkości skażenia świetlnego, jak i dwuletnie przetrzymywanie samców kosów w warunkach minimalnej intensywności nocnego światła, od którego jednak nie było ucieczki. U tych osobników zupełnie nie rozwinęły się gonady po okresie zimowej refrakcji, a przecież kosy zamieszkujące miasta jednak się rozmnażają!

W opublikowanym w 2019 roku artykule przeglądowym [52] piętnastu naukowców z trzynastu krajów Europy dokonało przeglądu dostępnego piśmiennictwa, obejmującego prace doświadczalne zajmujące się związkiem pomiędzy skażeniem światłem a syntezą melatoniny u wszystkich gromad kręgowców. Najwięcej badań

dotyczy oczywiście ssaków, w tym także ludzi, ale we wnioskach zwraca się uwagę na niekompletność dostępnych danych (zwłaszcza ubogo pod tym względem prezentuje się wiedza dotycząca płazów i gadów) oraz na kluczowe znaczenie pogłębienia wiedzy o wpływie ALAN na zegar biologiczny (za pośrednictwem hamowania syntezy melatoniny). Celem tego opracowania jest zwrócenie uwagi na konieczność podejmowania strategii łagodzących te niekorzystne efekty, aby móc kształtować warunki niezbędne dla dobrostanu i dostosowania gatunków żyjących w ekosystemach miejskich, a także zdrowia ludzi.

W części przeglądu literatury dotyczącej ptaków znalazło się jedynie dziesięć publikacji, a wszystkie badania wpływu ALAN na melatoninę toczyły się w warunkach laboratoryjnych. Dlatego oczywistością jest postulat ich rozszerzenia na warunki terenowe, wspieranie rozwiązywania problemów ekologicznych w powiązaniu z sezonem oraz intensywnością i barwą światła, których także brak z ptakami w roli głównej.

Główne wnioski, dotyczące ptaków, na które badacze zwracają uwagę [52], to:

- 1) ALAN hamuje nocne uwalnianie melatoniny nawet przy niskich wartościach natężenia (0,3 lx). Supresja dokonuje się szybko, a efekt jest widoczny nawet po 12 minutach. Synteza melatoniny spada już pierwszej nocy działania ALAN i nawet krótki puls światła jest zdolny do wywołania tego efektu. Towarzyszy temu zmiana behawioru, zwłaszcza czasowe przesunięcie dobowego wzorca aktywności lokomotorycznej, zazwyczaj zwiększenie nocnej, a czasem ogólnej ruchliwości;
- 2) stopień supresji melatoniny zależy u ptaków od natężenia oświetlenia, dawki i wrażliwości gatunkowej;
- 3) ekspozycja na ALAN w początkowej części nocy wydaje się opóźniać rytm melatoniny zaś późno w nocy z reguły go przyspiesza. Jednak ciągłe światło w nocy zazwyczaj ma różne efekty; np. u kosów hamuje melatoninę przez całą noc, choć większy efekt jest tuż po zmierzchu lub przed świtem, w porównaniu do światła działającego w środku nocy. Używanie oświetlenia tylko w części nocy, co wydaje się rozwiązaniem do przyjęcia przez władze miast, może być skuteczną metodą ograniczenia obecności ALAN i jego skutków. Potrzeba zatem więcej badań, aby potwierdzić sugestię, że oświetlając miasto lub jego część tylko w pierwszej połowie nocy można istotnie minimalizować wpływ ALAN na syntezę melatoniny (a więc i na dobrostan ptaków);
- 4) efekt hamujący melatoninę jest znacznie większy pod wpływem światła wzbogaconego niebieskim niż ciepłego białego – brak jednak takich badań na ptakach i trzeba pilnie wypełnić tę lukę;
- 5) konieczne jest powiększenie zakresu badań, obejmując więcej gatunków ptaków i liczbę osobników, a także zwiększając wybór źródeł światła, z uwzględnieniem charakterystyk spektralnych emitowanego promieniowania;
- 6) niezbędne jest pogłębienie wiedzy o skutkach supresji melatoniny przez ALAN widocznych w behawiorze, zdrowiu i dostosowaniu ptaków. Zmieniony wzorec aktywności może mieć poważne implikacje dla relacji ofiara–drapieżnik,

zdobywania pokarmu czy dla gospodarowania zasobami energetycznymi. Dlatego pilne są dalsze badania z wykorzystaniem możliwości pomiaru melatoniny u dzikich ptaków w warunkach ALAN.

Przedstawione wnioski podsumowujące rezultaty badań nad wpływem skażenia światłem na melatoninę nie uwzględniają konieczności rozszerzania wiedzy o innych mechanizmach, z zegarowym i epigenetycznym łącznie, najlepiej prowadzonych na dostosowanych do życia w mieście gatunkach ptaków, nie tylko śpiewających.

## Literatura

- [1] Dmowski S., *Urbanizacja na świecie, Materiały pomocnicze do nauki*, [https://www.geografia24.eu/geo\\_prezentacje\\_rozsz\\_2/382\\_2\\_ludnosc\\_urbanizacja/r\\_2\\_2\\_10a.pdf](https://www.geografia24.eu/geo_prezentacje_rozsz_2/382_2_ludnosc_urbanizacja/r_2_2_10a.pdf) – 6 września 2020 (dostęp: 06.09.2020).
- [2] *Przeludnienie Ziemi – czym musi się skończyć...*, Prepperis, 2022, <http://prepperis.pl/znaki-ostrzegawcze/przeludnienie-ziemi-czym-musi-sie-skonczyc/> (dostęp: 06.09.2020).
- [3] Dominoni D.M., Nelson R.J., *Artificial light at night as an environmental pollutant: An integrative approach across taxa, biological functions, and scientific disciplines*, *Journal of Experimental Zoology*, 2018, 329, s. 387–393, DOI: 10.1002/jez2241.
- [4] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, *Science Advances*, 2016, 2, art. e1600377, DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- [5] Kołomański, S., *Zanieczyszczenie światłem i ciemność*, *Prace i Studia Geograficzne*, 2014, 53, s. 29–46.
- [6] Gaston, K.J., Sian, G., Bennie, J., Hopkins J., *Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment*, *Environmental Reviews*, 2015, 23, 1, s. 14–23, DOI: 10.1139/er-2014-0041.
- [7] Skarżyński K., *Iluminacja obiektów architektonicznych a zanieczyszczenie środowiska światłem*, *Kosmos*, 2015, 64, s. 553–562.
- [8] Stevens, R.G., Zhu Y., *Electric light, particularly at night, disrupts human circadian rhythmicity: is that a problem?*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370, DOI: 10.1098/rstb.2014.0120.
- [9] Dominoni, D.M., Boringer, J.C., Nelson, R.J., *Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms*, *Biology Letters*, 2016, 12, art. 20160015, DOI: 10.1098/rsbl.2016.0015.
- [10] Ibáñez C., *Scientific Background: Discoveries of Molecular Mechanisms Controlling the Circadian Rhythm*, *Nobelförsamlingen. The Nobel Assembly at Karolinska Institutet*, <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2017/advanced-information/> (dostęp: 01.10.2017).
- [11] Hastings M.H., Reddy A.B., Maywood E.S., *A clockwork web: circadian timing in brain and periphery, in health and disease*, *Nature Reviews Neuroscience*, 2003, 4, s. 649–661, DOI: 10.1038/nrn1177.
- [12] Bell-Pedersen D., Cassone V.M., Earnest D. J., Golden S.S., Hardin P.E., Thomas T.L., Zoran M.J., *Circadian rhythms from multiple oscillators: lessons from diverse organisms*, *Nature Reviews Drug Discovery*, 2005, 6, s. 544–556, DOI: 10.1038/nrg1633.
- [13] Hunt T., Sassone-Corsi P., *Riding tandem: Circadian clocks and the cell cycle*, *Cell*, 2007, 129, 3, s. 461–464, DOI: 10.1016/j.cell.2007.04.015.

- [14] Krzeptowski W.D., *Molekularne mechanizmy zegara okołodobowego, czyli jak organizmy mierzą czas*, Kosmos, 2012, 61, s. 305–318.
- [15] Foster R.G., Kreitzman L., *The rhythms of life: what your body clock means to you!*, Experimental Physiology, 2014, 99, 4, s. 599–606, DOI: 10.1113/expphysiol.2012.071118.
- [16] Froy O., *The circadian clock and metabolism*, Clinical Science, 2011, 120, 2, s. 65–72, DOI: 10.1042/CS20100327.
- [17] Gillman A.G., Rebec G.V., Pecoraro N.C., Kosobud A.E.K., *Circadian entrainment by food and drugs of abuse*, Behavioural Processes, 2019, 165, s. 23–38, DOI: 10.1016/j.beproc.2019.05.017.
- [18] Giebultowicz, J., *Mechanism of circadian clock. The 2017 Nobel Prize in physiology or medicine*, Kosmos, 2018, 67, s. 245–249.
- [19] Berson, D.M., Dunn, F., Takao, M., *Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock*, Science, 2002, 295, 5557, s. 1070–1073, DOI: 10.1126/science.1067262.
- [20] Reiter R.J., *The melatonin rhythm: both a clock and a calendar*, Experientia, 1993, 49, 8, s. 654–664, DOI: 10.1007/BF01923947.
- [21] Skwarło-Sońta K., *Melatonina: hormon snu czy hormon ciemności?*, Kosmos, 2014, 63, s. 223–231.
- [22] Dubocovich M., Markowska M., *Functional MT1 and MT2 melatonin receptors in mammals*, Endocrine, 2005, 27, 2, s. 101–110, DOI: 10.1385/ENDO:27:2:101.
- [23] Arendt J., *Melatonin: countering chaotic time cues*, Frontiers in Endocrinology, 2019, 10, art. 391, DOI: 10.3389/fendo.2019.00391.
- [24] Cyunel M., Czaplicka A., Stochel-Cyunel J., *Oświetlenie miejskie w kontekście zanieczyszczenia światłem*, Kosmos, 2015, 64, s. 537–544.
- [25] Erren T.C., Reiter R.J., *Light hygiene: Time to make preventive use of insights – old and new – into the nexus of the drug light, melatonin, clocks, chronodisruption and public health*, Medical Hypotheses, 2009, 73, 4, s. 537–541, DOI: 10.1016/j.mehy.2009.06.003.
- [26] Skwarło-Sońta K., *Skażenie światłem: Co dziś wiemy o jego wpływie na funkcjonowanie organizmu człowieka?*, Kosmos, 2015, 64, s. 633–642.
- [27] Zubidat, A.E., Fares B., Fares F., Haim A., *Melatonin functioning through DNA methylation to constricts breast cancer growth accelerated by blue LED light-at-night in 4T1 tumor-bearing mice*, Journal of Cancer Biology and Therapeutics, 2015, 1, 2, s. 57–73, DOI: 10.18314/gjct.v1i2.35.
- [28] Zubidat A.E., Haim A., *Artificial light-at-night – a novel lifestyle risk factor for metabolic disorder and cancer morbidity*, Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology, 2017, 28, s. 295–313, DOI: 10.1515/jbcpp-2016-0116.
- [29] Zubidat A.E., Fares B., Fares F., Haim A., *Artificial light at night of different spectra compositions differentially affects tumor growth in mice: interaction with melatonin and epigenetic pathways*, Cancer Control, 2018, 25, 1, art. 1073274818812908, DOI: 10.1177/1073274818812908.
- [30] *Painting, firefighting, and shiftwork*, IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol. 98, International Agency for Research on Cancer, 2010.
- [31] Cos S., Mediavilla D., Martínez-Campa C., González A., Alonso-González C., Sánchez-Barceló E.J., *Exposure to light-at-night increases the growth of DMBA-induced*

- mammary adenocarcinomas in rats*, *Cancer Letters*, 2006, 235, 2, s. 266–271, DOI: 10.1016/j.canlet.2005.04.025.
- [32] Challet E., *Minireview: Entrainment of the suprachiasmatic clockwork in diurnal and nocturnal mammals*, *Endocrinology*, 2007, 148, 12, s. 5645–5655, DOI:10.1210/en.2007–0804.
- [33] Partecke J., Van't Hof T.J., Gwinner E., *Underlying physiological control of reproduction in urban and forest-dwelling European blackbirds *Turdus merula**, *Journal of Avian Biology*, 2005, 36, s. 295–305, DOI: 10.1111/j.0908–8857.2005.03344.x.
- [34] Rowan W., *London starlings and seasonal reproduction in birds*, *Proceedings of the Zoological Society of London. A*, 1938, 108, s. 51–78, DOI: 10.1111/j.1469–7998.1938.tb00021.x.
- [35] Dominoni D.M., Quetting M., Partecke J., *Long-term effects of chronic light pollution on seasonal functions of European blackbirds (*Turdus merula*)*, *PLoS ONE*, 2013, 8, art. e85069, DOI: 10.1371/journal.pone.0085069.
- [36] Kulczykowska E., Kasprzak M., Kalamarż H., Kuriata M., Nietrzeba M., Jerzak L., Kamiński P., *Melatonin and thyroxine response to pollution in white stork nestlings (*Ciconia ciconia*): Aspects of rhythmicity and age*, *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 2007, 146, 3, s. 392–397, DOI: 10.1016/j.cbpc.2007.04.012.
- [37] Van Doren BM, Horton KG, Dokter AM, Klinck H., Elbin SB, Farnsworth A., *High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration*, *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 2017, 114, s. 11175–11180, DOI: 10.1073/pnas.1708574114.
- [38] Dominoni D.M., Carmona-Wagner E.O., Hofmann M., Kranstauber B., Partecke J., *Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds*, *Journal of Animal Ecology*, 2014, 83, s. 681–692, DOI: 10.1111/1365–2656.12150.
- [39] Kempnaers B., Borgström P., Loës P., Schlicht E., Valcu M., *Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds*, *Current Biology*, 2010, 20, s. 1735–1739, DOI: 10.1016/j.cub.2010.08.028.
- [40] Da Silva A., Valcu M., Kempnaers B., *Behavioural plasticity in the onset of dawn song under intermittent experimental night lighting*, *Animal Behaviour*, 2016, 117, s. 155–165, DOI: 10.1016/j.anbehav.2016.05.001.
- [41] Dominoni D.M., Quetting M., Partecke J., *Artificial light at night advances avian reproductive physiology*, *Proceedings of the Royal Society, Biology*, 2013, 280, art. 20123017, DOI: 10.1098.rspb.2012.3017.
- [42] Dominoni D.M., Goyman W., Helm B., Partecke J., *Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): implications of city life for biological time-keeping of songbirds*, *Frontiers in Zoology*, 2013, 10, art. 60, DOI: 10.1186/174–9994–10–60.
- [43] Dawson A., King V.M., Bentley G.E., Ball G.F., *Photoperiodic control of seasonality in birds*, *Journal of Biological Rhythms*, 2001, 16, s. 365–380, DOI: 10.1177/074873001129002079.
- [44] Gwinner E., Wozniak J., *Circannual rhythms in European starlings: Why do they stop under long photoperiods?*, *Journal of Comparative Physiology A*, 1982, 146, s. 419–421, DOI: 10.1007/BF00609438.
- [45] De Jong M., Jeninga L., Ouyang J., van Oers K., Spoelstra K., Visser M.E. *Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night*, *Physiology & Behavior*, 2016, 155, s. 172–179, DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.12.0.

- [46] Spoelstra K., Verhagen I., Meijer D., Visser M., *Artificial light at night shifts activity patterns but not the internal clock in the great tit (Parus major)*, Proceedings of the Royal Society B, 2018, 285, 185, art. 20172751, DOI: 10.1098/rspb.2017.2751.
- [47] Alaasam V.J., Liu X., Niu Y., Habibian J.S., Pieraut S., Ferguson B.S., Zhang Y., Ouyang J.Q., *Effects of dim artificial light at night on locomotor activity, cardiovascular physiology, and circadian clock genes in a diurnal songbird*, Environmental Pollution, 2021, 282, art. 117036, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117036.
- [48] Turkowska E., Majewski P.M., Rai S., Skwarło-Sońta K., *Pineal oscillator functioning in the chicken – Effect of photoperiod and melatonin*, Chronobiology International, 2013, 31, 1, s. 134–143, DOI: 10.3109/07420528.2013.832279.
- [49] Hardeland R., *Future demands concerning the epigenetic relevance of melatonin and the circadian system in gerontology*, Journal of Geriatric Medicine and Gerontology, 2017, 3, 4, art. 036, DOI: 10.23937/2469–5858/1510036.
- [50] Ahmad S.F., Shanaz S., Kumar A., Dar A.H., Mohmad A., Bhushan B., *Crosstalk of epigenetics with biological rhythmicity in animal kingdom*, Biological Rhythm Research, 2019, 52, 4, s. 495–503, DOI: 10.1080/09291016.2019.1607218.
- [51] Skwarło-Sońta K., Zużewicz K., *Night shift work desynchronizes circadian rhythm via epigenetic mechanisms*, [w:] *Ecological and astronomical aspects of light pollution*, T. Ścieżor (ed.), Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków 2021, s. 17–31.
- [52] Grubisic M. et al., *Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates*, Sustainability, 2019, 11, 22, art. e6400, DOI: 10.3390/su11226400.

## EFFECT OF LIGHT POLLUTION ON THE PHYSIOLOGY OF CITY BIRDS

**Abstract:** Globally progressing urbanization generates a continuous increase in light pollution which become more and more oppressive not only for humans but also for other city dwellers, i.e. flora and fauna. With advances in the research on the noxious effect of light pollution on human physiology and health, the mechanisms involved in the disruption of diurnal rhythms and melatonin synthesis by the light at night slowly start to be understood. On the contrary, similar knowledge concerning city-dwelling animals is still rather scarce. The aim of the present chapter is to summarize available data on the physiology and behavior of the songbird species adapted to life in light-polluted cities. To have an insight into the molecular mechanisms involved in these adaptations, the results of experimental data obtained in the laboratory conditions are also presented.

**Keywords:** light pollution, diurnal rhythm, biological clock, melatonin, songbirds



# WPŁYW ZANIECZYSZCZENIA SZTUCZNYM ŚWIATŁEM NA PTAKI – PODSUMOWANIE BADAŃ

Karolina Skorb

Zespół Ekologii Krajobrazu, Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt  
Polskiej Akademii Nauk  
*skorb@isez.pan.krakow.pl*

**Streszczenie:** Sztuczne oświetlenie jest jednym z najczęściej nadużywanych dóbr cywilizacyjnych, które w znacznym stopniu oddziałuje na środowisko naturalne. Ptaki są organizmami, których funkcjonowanie zarówno w ciągu doby, jak i roku jest istotnie regulowane naturalnymi cyklami światła. Posiadają fotoreceptory zlokalizowane nie tylko w siatkówce, ale także w różnych częściach mózgu, co czyni je szczególnie wrażliwymi na światło. Z tego względu zanieczyszczenie sztucznym światłem jest czynnikiem istotnie zaburzającym prawidłowe funkcjonowanie ptaków. Badania udowadniają, że ekspozycja na światło w nocy znacząco wpływa na sen, lęgi, kondycję, metabolizm, odporność, stres, migracje oraz wiele innych aspektów życia ptaków. Światło jest także jednym z czynników znacząco zwiększających śmiertelność ptaków, a także ograniczającym zasięgi ich występowania. Wyniki te udowadniają, że istotne jest ograniczenie emisji zanieczyszczenia sztucznym światłem, które jest jednym z największych zagrożeń dla bioróżnorodności na świecie.

**Słowa kluczowe:** ptaki, zanieczyszczenie światłem, rytmy dobowe, rytmy roczne, śmiertelność

## 1. Wstęp

Rytm życia na Ziemi od milionów lat jest regulowany przez światło słoneczne. Większość organizmów wyewoluowała molekularne zegary dobowe kontrolowane przez naturalne cykle dnia i nocy. Zegary te mają istotny wpływ na metabolizm, rozwój i zachowanie zwierząt [1]. Dobrym przykładem – ilustrującym jak kluczową rolę odgrywa światło w regulacji wzorców zachowań, zarówno w cyklu dobowym, jak i rocznym – są ptaki [2]. Kręgowce te, podobnie jak wiele innych organizmów, nie tylko



reagują na bodźce świetlne, ale wykształciły także endogenne mechanizmy, zwany rytmem dobowym, który pomaga im śledzić i przewidywać zmiany w środowisku na podstawie regularnych cykli światła. W podobny sposób funkcjonują rytmy roczne, będące odpowiedzią organizmu na cykliczne zmiany długości dnia w tym czasie [3]. Z tego względu zanieczyszczenie światłem, zaburzające percepcję naturalnych cykli światła, może w istotnym stopniu wpływać na rytmy funkcjonowania ptaków.

Pierwsze przesłanki mówiące o negatywnym oddziaływaniu światła w nocy na ptaki pochodzą sprzed ponad stu lat. Latarnicy z kalifornijskiego wybrzeża zgłaszali liczne kolizje ptaków z latarniami morskimi, szczególnie wiosną i jesienią, czyli w okresie sezonowych migracji [4]. Kolejne duże zdarzenia relacjonowano w latach 50. XX wieku, gdy dziesiątki tysięcy ptaków rozbiło się o oświetlone lotnisko sił powietrznych Warner Robins w Stanach Zjednoczonych, najprawdopodobniej myląc jasną powierzchnię lotniska z taflą wody [5]. Obecnie w dobie zwiększającej się z roku na rok emisji światła na całym świecie, zanieczyszczenie sztucznym światłem ALAN (ang. *Artificial Light at Night*) stało się jednym z głównych czynników antropogenicznych, odpowiedzialnych za wiele zaburzeń w środowisku naturalnym [6]. Dzięki nowym technologiom wiadomo, że oddziałuje nie tylko na kolizje ptaków z elementami architektury, ale także wpływa na elementarne funkcje wielu organizmów. Niniejsze opracowanie zawiera podsumowanie badań naukowych dotyczących wpływu zanieczyszczenia światłem na różne aspekty życia ptaków.

## 2. Wpływ światła na funkcjonowanie ptaków

### 2.1. Fotorecepcja u ptaków

Światło jest jednym z najważniejszych czynników środowiskowych wpływających na rytm i sezonowość funkcjonowania ptaków, zarówno w cyklu rocznym, jak i dobowym. Z tego względu ta grupa zwierząt jest szczególnie wrażliwa na zmiany światła, a jego subtelne różnice pomaga im wychwycić szeroka gama fotoreceptorów zlokalizowanych w siatkówce oka oraz różnych narządach ośrodkowego układu nerwowego. Do wykrywania światła i przesyłania informacji o nim wykorzystują one fotopigmenty bazujące na opsynach [7]. Opsyny to grupa receptorów błonowych sprzężonych z białkami G (GPCR, *G Protein-Coupled Receptor*), które mogą zmieniać swoją aktywność ze stanu spoczynkowego do stanu aktywnego, sygnalizującego absorpcję światła. Aktywacja białka G przez światło prowadzi do powstania sygnału neurochemicznego, znanego jako fototransdukcja [8].

Najbardziej znanymi fotoreceptorami są pręciki i czopki, które zlokalizowane są w siatkówce oka. Pręciki są bardzo wrażliwe na bodźce świetlne, dlatego uczestniczą w reakcji wzrokowej przy słabych warunkach oświetleniowych, zapewniając tworzenie obrazu w niskiej rozdzielczości. Czopki natomiast uczestniczą w tworzeniu obrazów przy dużych mocach promieniowania, dlatego są mniej wrażliwe na niewielkie zmiany jego poziomu, pośrednicząc w generowaniu obrazów o wysokiej

rozdzielczości. Informacje zebrane przez pręciki i czopki, zanim dotrą do mózgu przez nerw wzrokowy, są przetwarzane przez komórki zwojowe siatkówki RGC (ang. *retinal ganglion cell*). Część RGC jest również światłoczuła i określa się je jako światłoczułe komórki zwojowe siatkówki ipRGC (ang. *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*). Komórki ipRGC oddziałują na główne części mózgu i są szczególnie ważne przy odpowiedziach niewzrokowych, takich jak ekspresja rytmów okołodobowych [9]. Innym ważnym miejscem fotorecepcji u ptaków jest szyszynka. W przeciwieństwie do ssaków, gdzie pełni ona jedynie funkcję wydzielniczą i nie jest światłoczuła, szyszynka ptasia zawiera własną opsyne, pinopsynę (P-opsynę), z maksimum przypadającym przy długości fali z zakresu 460–470 nm, będąc szczególnie czułą na światło niebieskie [10]. Ze względu na wrażliwość na światło, szyszynka odgrywa kluczową rolę w regulacji ptasich rytmów okołodobowych [2].

W niedawnych badaniach scharakteryzowano także zestaw fotoreceptorów w mózgu u kur, których istnienie od dawna sugerowano, jednak ich struktura i właściwości były wciąż nieuchwytnie. VA-opsyna została znaleziona w podwzgórzu kurcząt, z maksimum przypadającym przy długości fali około 460 nm. Fotoreceptory te są najprawdopodobniej zaangażowane w regulację biologii sezonowej i wyjaśniają, dlaczego wczesne badania wykazały, że oślepienie ptaki są w stanie przejść pełne sezonowe rytmy wzrostu i regresji gonad [11].

## 2.2. Światło i cykl dobowy ptaków

Tak jak wiele innych organizmów, tak też ptaki w toku ewolucji dopasowały swoje cykle aktywności i odpoczynku w zależności od światła słonecznego, które nazywamy rytmami okołodobowymi. Rytmu te funkcjonują prawidłowo, jeśli są zsynchronizowane z warunkami środowiska. Jak u większości organizmów, tak też u ptaków, światło jest najsilniejszym synchronizatorem cykli dobowych [7].

Ptaki posiadają zaangażowane w ekspresję i regulację rytmów okołodobowych fotoreceptory zlokalizowane w oczach, podwzgórzu i szyszynce. Z tego powodu system dobowy u ptaków jest bardziej złożony niż u ssaków. Szyszynka działa jako kluczowe miejsce transdukcji sygnału świetlnego, przekształcając informację świetlną w sygnał chemiczny, który ulega rozproszeniu poprzez produkcję i wydzielanie melatoniny bezpośrednio do krwi i płynu mózgowo-rdzeniowego [12]. Szyszynka uwalnia melatoninę w nocy, ale jej wytwarzanie jest hamowane w ciągu dnia przez światło słoneczne, co nadaje melatoninie ważną rolę nadrzędnego hormonu dobowego sterującego cyklami aktywności i snu.

## 2.3. Światło i cykl roczny ptaków

Podobnie jak aktywność dobową ptaków zależy od zmieniających się cykli światła i ciemności, stymulujących wydzielanie melatoniny, tak też cykl roczny ptaków w dużej mierze zależy od ekspozycji na światło. Na skutek wydłużającego się wiosną dnia ptaki rozpoczynają wędrówkę wiosenną, przystępują do lęgów, a gdy dzień jest

zauważalnie krótszy, ptaki podejmują jesienną migrację [13, 14]. Są to zjawiska fenologiczne, występujące cyklicznie w ciągu roku, których terminy są także dostosowane do zmieniających się warunków klimatycznych i środowiskowych.

Ptaki, odbierając bodźce świetlne o wydłużającym się dniu, rozpoczynają łańcuch reakcji stymulowanych hormonalnie, który ma przygotować ich ciało do rozmnażania. Neurony światłoczułego podwzgórza zaczynają uwalniać gonadoliberynę do przysadki mózgowej. Pobudzona przysadka syntetyzuje gonadotropiny, stymulując gonady do dojrzewania, wytwarzania gamet oraz wydzielania hormonów płciowych [15]. W ciągu ostatnich lat stwierdzono, że również melatonina może wpływać na rozmnażanie u ptaków. Jej receptory zidentyfikowano w jądrze kontroli śpiewu, co potwierdza, że może bezpośrednio wpływać na plastyczność systemu kontroli śpiewu [16, 17]. Czułość receptorów melatoniny jest blokowana podczas lęgów i podwyższana zimą, kiedy stymuluje ją wydłużający się dzień [16]. Potwierdzono także, że melatonina stymuluje uwalnianie gonadostatyny GnIH (ang. *gonadotropic-inhibitory hormone*) z podwzgórza ptaków, czyli hormonu hamującego rozmnażanie sezonowe [18]. Wyniki te wskazują, że melatonina może odgrywać ważną rolę w regulacji cyklów lęgowych u ptaków. Uwalnianie melatoniny z szyszynki jest bezpośrednio zależne od światła, dlatego wydłużający się wiosną dzień ma silny wpływ na jej produkcję, zatem także pośrednio na stan dojrzałości do rozrodu [7].

### 3. Wpływ zanieczyszczenia sztucznym światłem na ptaki

Zależność cykli dobowych i rocznych u ptaków od zmian poziomu natężenia oświetlenia, którego źródłem jest światło dzienne sprawia, że zanieczyszczenie sztucznym światłem stanowi czynnik, który może w znacznym stopniu zaburzać naturalne procesy. Ze względu na złożoność zjawiska zdecydowano się oddzielnie omówić wpływ oddziaływania światła w nocy na różne aspekty życia ptaków.

#### 3.1. Cykl dobowy

Światło jest najważniejszym synchronizatorem ptasiego zegara dobowego, a niezliczona liczba procesów fizjologicznych jest pod jego kontrolą [19], dlatego zmiany w środowisku świetlnym w nocy wpływają na wiele funkcji biologicznych tych organizmów.

Modyfikacja dobowego rytmu ptaków jest jednym z najbardziej znanych ekologicznych skutków zanieczyszczenia światłem. Odkryto, że w różnych regionach świata kilka gatunków ptaków śpiewających modyfikuje czas rozpoczęcia śpiewu na obszarach zanieczyszczonych światłem. Efekt jest najsilniejszy w przypadku niektórych naturalnie wcześniej śpiewających gatunków [7]. Badania nad wpływem zanieczyszczenia światłem na ptaki przeprowadzone w Niemczech na sześciu pospolitych gatunkach ptaków (kos *Turdus merula*, rudzik *Erithacus rubecula*, śpiewak *Turdus philomelos*, bogatka *Parus major*, modraszka *Cyanistes caeruleus*, zięba *Fringilla coelebs*), w których uwzględniono także hałas drogowy, wykazały, że aż pięć

z nich rozpoczyna swój poranny śpiew wcześniej. Jedynym gatunkiem, dla którego nie wykazano wpływu ALAN na godzinę rozpoczęcia aktywności głosowej była zięba [20]. W innych badaniach, gdzie śpiewak nie był brany do analizy, wyniki były bardzo zbliżone [21], co podkreśla, że efekt ten jest silniejszy u gatunków naturalnie wcześniej śpiewających. Kontynuacja niemieckich badań wykazała, że ALAN wpływa nie tylko na dobowe zmiany w aktywności ptaków, ale także na rozpoczęcie śpiewu w cyklu rocznym [22].

Nie tylko badania nad śpiewem ptaków udowadniają istotny wpływ zanieczyszczenia światłem na cykle aktywności dobowej ptaków. W budkach lęgowych, gdzie zamontowano sztuczne oświetlenie wykazano, że samice modraszek znacząco przyspieszają swój poranny początek aktywności w sezonie lęgowym [23]. Wyniki te potwierdzają także badania na innych gatunkach ptaków. Badano aktywność miejskich i leśnych kosów wyposażonych w czujniki światła i nadajniki radiotelemetryczne. Wyniki pomiarów udowadniały, że ptaki eksponowane późnym wieczorem na światło wykazywały wcześniejszą aktywność o poranku. Ponadto indywidualna ekspozycja na światło w nocy była związana nie tylko z początkiem aktywności o poranku, ale także jej zakończeniem wieczorem: im bardziej kosy były narażone na zanieczyszczenie światłem, tym miały większą tendencję do wydłużania okresu dziennej aktywności [24]. Kolejne badania potwierdziły, że miejskie kosy są wystawione średnio na o 49 minut dłuższy dzień niż ptaki żyjące w lasach [25].

Ważnym aspektem wpływu zanieczyszczenia światłem na rytm dobowy ptaków jest zaburzenie snu. Sen jest podstawową potrzebą wszystkich organizmów, którego funkcji upatruje się w „oczyszczaniu” mózgu z toksycznych metabolitów nagromadzonych podczas jego aktywności [26]. U ptaków sen jest stymulowany za pomocą melatoniny, którą wydziela szyszynka w sposób rytmiczny: nocne okresy ciemności stymulują do jej uwalniania, zaś ekspozycja na światło tłumi jej wydzielanie [27]. Wciąż jednak miało wiadomo o dokładnym poziomie światła, który zmienia dobową amplitudę rytmu melatoniny. U wielu gatunków ptaków śpiewających wydzielanie i tłumienie melatoniny jest niezbędne do utrzymania rytmów dobowych w stałych warunkach oraz do synchronizacji zegara dobowego z cyklem dzień/noc [12].

Ponieważ rytm dobowy, sen i światło są ze sobą silnie powiązane, zanieczyszczenie światłem może potencjalnie mieć duży wpływ na wzorce snu dzikich ptaków. Badania eksperymentalne na kosach trzymanyh w niewoli w warunkach stałego zanieczyszczenia światłem w nocy na poziomie 0,3 lx ujawniły średnio o dwie godziny wcześniejszą poranną aktywność ptaków w porównaniu do grupy kontrolnej pozbawionej ALAN. Zmiana pory aktywności była powiązana na poziomie osobniczym ze stężeniem melatoniny w osoczu [28]. Badania eksperymentalne na bogatkach wykazały ponadto silną zależność między intensywnością światła w nocy a poziomem uwalnianej melatoniny. Wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia zwiększała się aktywność ptaków w nocy, a znacząco spadał poziom melatoniny [29]. Wyniki te sugerują, że wraz ze wzrostem poziomu zanieczyszczenia światłem stany aktywności i odpoczynku u ptaków mogą ulegać znacznym zaburzeniom.

Badania wskazują także wpływ sztucznego światła w nocy bezpośrednio na zachowanie ptaków w trakcie snu. Przy użyciu kamer monitorowano zachowanie modraszek i bogatek w budkach lęgowych, gdzie wcześniej umieszczono źródła światła. Wyniki porównano z nagraniami z nocy, kiedy oświetlenie w budkach było wyłączone. Zachowanie obu gatunków podczas snu nie różniło się w warunkach naturalnych, stwierdzono jednak różnice przy nocnym doświetlaniu budek. Światło zakłóciło sen obu gatunkom sikor, jednak bogatki silniej na nie reagowały – później wchodziły do budek lęgowych i później zasypiały, wcześniej się budziły i wcześniej opuszczały budki, a całkowita długość snu uległa znaczącemu zmniejszeniu [30]. Eksperyment ten udowadnia, że nawet blisko spokrewnione gatunki ptaków mogą cechować się różną wrażliwością na światło w nocy.

Inne badania nad bogatkami w budkach wykazały, że ptaki cierpiące na deficyt snu z powodu zanieczyszczenia światłem, muszą go nadrobić. W okresie lęgowym przez kilka nocy monitorowano zachowanie samic w budkach, w których umieszczono emitujące światło diody. Przez pierwszą noc rejestrowano zachowanie ptaków w ciemnych warunkach, kolejnej nocy w sztucznym oświetleniu, a ostatniej ponownie bez światła. Badania wykazały, że bogatki w warunkach zanieczyszczenia światłem spały ponad 50% krócej. Ostatniej nocy natomiast ich sen wydłużył się o 25% w porównaniu do pierwszej nocy, jednocześnie ptaki zwiększyły częstość epizodów snu [31]. Wyniki te dowodzą, że niedobór snu u ptaków spowodowany oddziaływaniem światła w nocy w istotny sposób wpływa na ich zachowanie. Dług senny może negatywnie rzutować na kondycję ptaków, zmuszając je do nadrobienia deficytu, co może w znaczący sposób zaburzyć ich dobowy rytm funkcjonowania, jednocześnie potencjalnie zwiększając ryzyko narażenia na ataki drapieżników.

Badania aktywności mózgu dzierzbowronów *Cracticus tibicen tyrannica* wystawionych na światło w nocy o luminacji typowej dla obszarów miejskich wykazały, że światło białe w porównaniu do żółtego istotnie zaburza przebieg snu, zmniejszając jego ciągłość oraz znacząco zwiększając długość fazy NREM względem fazy REM [32]. Natomiast badania nad nocną aktywnością zeberek *Taeniopygia guttata* przeprowadzone z wykorzystaniem źródeł LED o ciepłej (3000 K) i chłodnej (5000 K) barwie światła, potwierdziły zwiększoną aktywność ptaków przy ekspozycji na światło o wyższej temperaturze barwowej [33]. Co ciekawe wyników tych nie potwierdzono w badaniach nad gołębiami skalnymi *Columba livia*, u których zarówno światło niebieskie, jak i żółte w podobnym stopniu zaburzało przebieg snu [32]. Podobne badania przeprowadzono na łabędziach czarnych *Cygnus stratus*, u których także wykazano brak istotnej różnicy w reakcji organizmu na światło z większym i mniejszym udziałem promieniowania krótkofalowego (światła niebieskiego) – oba rodzaje źródeł światła istotnie zaburzały przebieg snu u ptaków [34]. Badania te wskazują, że warto ograniczać emisję światła niebieskiego, jednak rozwiązanie to nie jest uniwersalne, by zmniejszyć oddziaływanie zanieczyszczenia sztucznym światłem na wszystkie gatunki ptaków.

### 3.2. Rozwój i stres

Zaburzenia snu i wydzielania melatoniny związane z emisją światła w nocy niosą ze sobą oddziaływanie także na inne funkcje organizmu. Badania nad papużkami falistymi *Melopsittacus undulatus* przeprowadzone pod kątem reakcji na światło w nocy z dodatkową próbą, w której ptakom podawano melatoninę wykazały, że ALAN wpłynęło na przyrost masy ciała, spożycie pokarmu i wody oraz drastycznie zmniejszyło zdolność rozrodczą poprzez kilkukrotnie mniejszą liczbę składanych jaj, z których wykuło się znacznie mniej piskląt. U ptaków testowano także odpowiedź na stres poprzez badanie zawartości kortykosteronu w odchodach, gdzie wykazano, że ALAN znacząco zwiększyło wydzielanie tego hormonu. Stymulacja ptaków melatoniną unormowała spożycie pokarmu i wody do poziomu kontrolnego, jednak spowodowała spadek masy ciała i nie zdołała utrzymać prawidłowej zdolności rozrodczej [35]. Wyniki te sugerują, że negatywne skutki wywołane przez ALAN zaburzą wiele czynności życiowych u ptaków, których kontrola nie zależy w pełni od supresji melatoniny bądź nasilonych reakcji na stres. Światło oddziałuje na ptaki w sposób złożony, stymulując wiele elementów szlaku fotoperiodycznego, tym samym wpływając na różne narządy wydzielania wewnętrznego.

Warto jednak dokładniej przyjrzeć się wywołanemu przez zanieczyszczenie światłem poziomowi stresu u ptaków, który często jest ważnym czynnikiem fizjologicznym, wpływającym na funkcjonowanie całego organizmu. Z badań, zarówno nad ptakami wolnożyjącymi narażonymi na zanieczyszczenie światłem [36], jak i w badaniach eksperymentalnych [33] wykazano, że ALAN koreluje z wyższym poziomem kortykosteronu, który jest hormonalnym wskaźnikiem stresu fizjologicznego. W przypadku ptaków trzymanyh w niewoli sprawdzono także, jak temperatura barwowa wpływa na poziom stresu. W przytaczanych już badaniach, zeberki narażone na światło o wyższej temperaturze barwowej, najbliższej 5000 K, poza wzmożoną nocną aktywnością, wykazywały podwyższony poziom kortykosteronu w porównaniu z wartościami sprzed eksperymentu oraz względem ptaków eksponowanych na światło o temperaturze barwowej najbliższej 3000 K, oraz grupą kontrolną [33].

Przebadano także, jak zanieczyszczenie sztucznym światłem wpływa na stres i kondycję piskląt. W budkach lęgowych, gdzie gniazdowały bogatki umieszczono załączane nocą diody LED, emitujące białe światło. U piskląt eksponowanych na ALAN wykazano wyższy poziom kortykosteronu niż u ptaków z grupy kontrolnej [37]. W tych samych badaniach sprawdzano także kondycję piskląt narażonych na światło w nocy. Jako miernik kondycji przyjęto stosunek długość skoku (nogi) do masy ciała. Pisklęta wystawione na działanie ALAN w stosunku do ptaków z grupy kontrolnej wykazywały większy stosunek wzrostu skoku wobec masy ciała, świadczący o pogarszającej się kondycji, co na tym etapie rozwoju może w znacznym stopniu obniżyć szanse na przeżycie. Ptaki spędzające noce w ciemnych warunkach charakteryzowały się bardziej równomiernym przyrostem masy ciała względem rozwoju szkieletu oraz większym sukcesem lęgowym [37].

### 3.3. Układ nerwowy

Sztuczne światło w nocy nie tylko wpływa na rozwój młodych ptaków. Może zaburzać zdolności poznawcze i umiejętności dostosowania się do zmieniających się warunków otoczenia dorosłych ptaków, wpływając na funkcjonowanie ośrodkowego układu nerwowego. W badaniach na samicach zeberek *Taeniopygia guttata* wykazano, że ALAN intensyfikuje proliferację komórek nerwowych w strefie komorowej VZ (ang. *ventricular zone*). U ptaków wiele nowych komórek powstających w VZ, migruje do kresomózgowia, różnicuje się w odpowiednie neurony i osadza w różnych obszarach mózgu, zastępując starsze komórki. Dlatego proliferacja komórek nerwowych w VZ przyczynia się do większej plastyczności mózgu i umożliwia ptakom przystosowanie się do zmian środowiskowych. Wyniki te wskazywałyby na to, że światło w pozytywny sposób stymuluje układ nerwowy ptaków. Niestety wraz z powstawaniem nowych komórek stwierdzono obumarcie części neuronów przejawiające się jako zmniejszenie ich gęstości w dwóch regionach mózgu ptaków [38, 39].

### 3.4. Metabolizm i wydatek energetyczny

Jak przedstawiono powyżej, zanieczyszczenie światłem wpływa na poziomy aktywności u wielu gatunków ptaków, zatem może mieć także wpływ na ich dzienny wydatek energetyczny DEE (ang. *daily energy expenditure*) oraz metabolizm. DEE jest silnym wskaźnikiem kompromisów ekologicznych i kondycji osobnika, więc może być ważnym aspektem przy badaniu potencjalnych długoterminowych skutków ekologicznych ekspozycji na zanieczyszczenie światłem.

W badaniach laboratoryjnych nad zmianami w mózgu u dorosłych zeberek przedstawiono również wyniki wskazujące na związek między ekspozycją na światło w nocy a zaburzeniami metabolizmu u ptaków, przejawiające się zwiększeniem masy ciała [38]. Wyniki te zostały potwierdzone w innych badaniach na tym samym gatunku, gdzie poza wzrostem masy ciała dodatkowo wykazano odkładanie podskórnej tkanki tłuszczowej i akumulację lipidów w wątrobie [40]. Podobne wyniki uzyskano w przytaczanych już badaniach na papużkach falistych, gdzie ptaki na skutek ekspozycji na ALAN także zwiększyły masę ciała [35]. Wzorzec ten nie jest jednak prawidłowy dla piskląt. Wykazano, że młode bogatki na skutek ekspozycji na światło przestały przybierać na wadze [41]. Natomiast badania na dorosłych ptakach dowodzą, że ptaki, które spały w warunkach zanieczyszczenia światłem, wykazywały zwiększony dzienny wydatek energetyczny w porównaniu z ptakami śpiącymi w ciemnościach [42].

DEE może być także związany ze stanem mikroflory w jelitach, która odpowiada za wydajne trawienie. Przytaczane już badania na zeberkach wskazują, że zaburzenia w przyroście masy u ptaków na skutek narażenia na światło w nocy mogą wynikać z redukcji flory jelitowej [40]. W badaniach laboratoryjnych stwierdzono zmniejszoną populację *Lactobacillus* jako częściową przyczynę negatywnego wpływu ALAN na

metabolizm ptaków. Niekorzystny wpływ zanieczyszczenia światłem na mikroflorę jelitową wykazano także u mazurek *Passer montanus*, u których również stwierdzono zaburzenia rytmu okołodobowego oraz sekrecji melatoniny [43]. Natomiast u młodych przepiórek chińskich *Excalfactoria chinensis* poddawanych ekspozycji na sztuczne światło barwy niebieskiej, o natężeniu oświetlenia 0,3 lx, wykazano, że ALAN zmniejszył wydajność trawienia w okresie najszybszego wzrostu szkieletu [44]. Wyniki te potwierdzają negatywny wpływ sztucznego oświetlenia na metabolizm i wydatek energetyczny u ptaków. Podkreślają także istotną rolę mikroflory jelitowej w utrzymaniu homeostazy metabolicznej w odpowiedzi na ekspozycje na światło w nocy.

### 3.5. Odporność

Kolejnym elementem na jaki może wpływać nocna ekspozycja ptaków na światło jest układ odpornościowy. Zbadano odpowiedź immunologiczną na wstrzyknięcie lipopolisacharydu u piskląt bogatek poddanych ekspozycji przez siedem nocy na światło o natężeniu oświetlenia 3 lx. Przed i po iniekcji zmierzono poziom haptoglobiny i tlenu azotu, które są ważnymi markerami odpowiedzi immunologicznej. Odpowiedni poziom haptoglobiny zapobiega uszkodzeniom oksydacyjnym poprzez wiązanie wolnej hemoglobiny uwalnianej z ulegających lizie krwinek czerwonych. Natomiast tlenek azotu uczestniczy w modulacji procesów zapalnych i niszczeniu patogenów. Odkryto, że ekspozycja na ALAN przed podaniem lipopolisacharydu zmieniła wrodzoną odpowiedź immunologiczną, obniżając poziom haptoglobiny i podwyższając poziom tlenu azotu. Po iniekcji nieoczekiwanie poziom tlenu azotu się obniżył, najprawdopodobniej na skutek oddziaływania niższego aż o 49% poziomu melatoniny [45]. Badanie to dostarcza dowodów na to, że narażenie na światło w nocy wpływa na fizjologię piskląt, co może mieć długofalowe efekty, potencjalnie rzutując na sprawność ptaków przez całe życie.

Zdolność zwierząt, w tym ptaków, do reagowania na zewnętrzne pasożyty i patogeny w dużej mierze zależy od pory dnia. Kiedy rytmy dobowe są zaburzone, niektóre odpowiedzi układu immunologicznego zostają stłumione [46]. W jednych badaniach przetestowano, jak ALAN wpływa na odporność komórkową i intensywność infekcji pasożytem z grupy *Haemosporidia* w cyklu rocznym u junczo zwyczajnego *Junco hyemalis*. Wykazano, że sztuczne światło w nocy nasiliło stan zapalny u ptaków, a liczba leukocytów znacząco wzrosła wczesną wiosną i jesienią, czyli w naturalnym okresie migracji ptaków. Na początku eksperymentu badania mikroskopowe potwierdziły infekcje u niewielkiej liczby ptaków, jednak badanie PCR ujawniło, że większość ptaków przechodziła przewlekłe infekcje. ALAN zwiększyło skalę infekcji pasożytniczych w cyklu rocznym, z silnymi szczytami wiosną i jesienią, których w większości nie stwierdzono u ptaków z grupy kontrolnej. Zwiększona liczba zachorowań u ptaków narażonych na światło w nocy wskazuje na nawrót przewlekłych infekcji, gdyż ptaki przetrzymywano w zamkniętych wolierach, z dala od innych patogenów [47]. Badania te udowadniają, że zaburzenia naturalnych cykli



dobowych mogą oddziaływać na wiele fizjologicznych aspektów życia ptaków, w znaczący sposób obniżając ich naturalną odporność.

Istnieje jeszcze jeden ciekawy aspekt związany z zanieczyszczeniem światłem i odpornością na choroby. Na przykładzie wróbla *Passer domesticus* stwierdzono, że zanieczyszczenie sztucznym światłem wydłuża okres zarażenia Wirusem Zachodniego Nilu WNV (ang. *West Nile Virus*) o 2 dni w okresie ptasich wędrówek. Jednocześnie nie wzrasta śmiertelność tych ptaków, ale zwiększa się potencjał wybuchu epidemii o 41%. Okazuje się, że osiadłe miejskie wróble są jednym z największych miejskich rezerwuarów tego niebezpiecznego dla ludzi patogenu. W dobie licznych chorób wywołanych patogenami odzwierzęcymi i wciąż panującej pandemii COVID-19, należy zwrócić szczególną uwagę na czynniki zwiększające ryzyko przenoszenia infekcji na obszarach skażonych światłem [48].

### 3.6. Fenologia rozrodu

Termin przystąpienia do lęgów u ptaków jest silnie związany z wydłużającym się wiosną dniem, a co za tym idzie dłuższą ekspozycją na światło słoneczne. Zatem zanieczyszczenie sztucznym światłem może znacząco wpływać na percepcję długości dnia przez ptaki, przyspieszając dojrzewanie płciowe i termin przystąpienia do lęgów.

W Europie kosi są jednym z najlepszych przykładów szybko przystosowującej się do warunków miejskich fizjologii rozrodu. Dwuletnie badania eksperymentalne nad miejskimi i leśnymi osobnikami, trzymanymi w laboratorium i eksponowanymi na zanieczyszczenie światłem wykazały, że w pierwszym roku ptaki rozwinęły swoje gonady o 3 tygodnie wcześniej niż kosi z grupy kontrolnej pozbawionej zanieczyszczenia światłem. Różnica ta została odzwierciedlona również przez wcześniejszy szczyt poziomu testosteronu w osoczu i wcześniejsze rozpoczęcie pierzenia [49]. W drugim roku badań u kosów eksponowanych na światło nie rozwinęły się gonady, poziom testosteronu był niski, a pierzenie zostało przerwane [50]. Natomiast w badaniach terenowych nad tym gatunkiem wykazano, że kosi preferują oświetlone miejsca lęgowe ze względu na ich funkcję antydrapieżniczą. Stwierdzono jednak, że ptaki te przyspieszyły termin przystąpienia do lęgów średnio o 6 dni na 1 lx nocnego oświetlenia [51]. Także u bogatek [52], jak i u junko zwyczajnego [53] stwierdzono przyspieszone dojrzewanie gonad na skutek ekspozycji na zanieczyszczenie światłem. Badania te udowadniają, jak silnie zanieczyszczenie sztucznym światłem może wpływać na rytmy roczne i termin przystępowania do lęgów, co może być bardzo niekorzystnym zjawiskiem, szczególnie wczesną wiosną, gdy ilość pożywienia jest wciąż niewystarczająca do wykarmienia piskląt.

Zmiany w fizjologii rozrodu na skutek ekspozycji na zanieczyszczenie światłem towarzyszą, choć nie zawsze, zmianom terminu składania jaj. W niemieckich badaniach z 2010 roku wykazano dwudniowe przyspieszenie terminu składania jaj u modraszek, zajmujących terytoria przy latarniach ulicznych [21]. Natomiast eksperyment terenowy przeprowadzony kilka lat później w Holandii, gdzie naukowcy zmienili poziom światła w ośmiu lasach, wykazał 5-dniowe przyspieszenie terminu

składania jaj [54]. W przypadku wpływu ALAN na termin rozpoczęcia zniesienia także barwa światła ma znaczenie. Ze względu na większą wrażliwość ptasich fotoreceptorów na promieniowanie o krótszych długościach fal [55] sugeruje się, że długie fale emitowane z czerwonych diod LED mają mniejszy wpływ na datę składania jaj w porównaniu z diodami niebieskimi i zielonymi [54]. Czasowa rozbieżność między wpływem ALAN na fizjologię rozrodu a terminem składania jaj sugeruje jednak, że podczas gdy dojrzewanie gonad jest w większości modulowane przez światło, a zatem zanieczyszczenie światłem może mieć na nie silny wpływ, tak data składania jaj to złożona decyzja, która jest regulowana nie tylko przez fotoperiodyzm, ale także przez inne czynniki lepiej odzwierciedlające warunki środowiskowe, takie jak temperatura czy obfitość pożywienia [56].

### 3.7. Sezonowe wędrówki

Cykle fenologiczne u ptaków obejmują również migracje sezonowe, które także są indukowane hormonalnie między innymi poprzez percepcję zmieniającej się długości dnia. Zatem zanieczyszczenie sztucznym światłem, zaburzające ekspozycję ptaków na naturalne cykle światła słonecznego, może być czynnikiem zakłócającym ptasie migracje. W badaniach z użyciem geolokatorów rejestrujących światło udało się określić skalę doświadczania przez ptaki wędrówne – jaskółczaki modre *Progne subis* – zanieczyszczenia światłem na zimowiskach w Ameryce Południowej. Liczbę nocy, gdy ptaki przebywały w warunkach sztucznego oświetlenia zestawiono z terminem rozpoczęcia migracji oraz datą przylotu na lęgowiska. Prawie jedna trzecia ptaków doświadczyła przynajmniej jednej nocy w warunkach zanieczyszczenia światłem. Ptaki, które doświadczyły największej liczby jasnych nocy wylatywały na wiosenną migrację średnio o osiem dni wcześniej i przylatywały na lęgowiska także osiem dni wcześniej w porównaniu z ptakami, które nie doświadczyły ALAN [57]. Przyspieszenie wiosennej migracji na skutek zanieczyszczenia światłem w miejscach zimowania może prowadzić do nieprawidłowego synchronizowania warunków środowiskowych i liczebności owadów na trasie migracji oraz w miejscach rozrodu, potencjalnie wpływając na przeżycie i/lub sukces reprodukcyjny.

Światło ponadto gra istotną rolę w percepcji położenia ptaków w powietrzu. Badania nad ptakami w klatkach wykazały, że kierują się w stronę sztucznego światła, które ma imitować słońce na horyzoncie. Kierowanie się położeniem słońca nad horyzontem jest jedną ze strategii migracyjnych ptaków, dlatego zanieczyszczenie sztucznym światłem jest istotnym czynnikiem zaburzającym prawidłowe wzorce migracyjne. Sugeruje się, że ptak, który nocą wleci w snop światła, traci punkt odniesienia jakim jest horyzont, tracąc orientację w przestrzeni. Przypuszcza się, że ptaki mogą odbierać światło emitowane z budynków, kominów czy turbin wiatrowych jako wskazówkę horyzontu, zmieniając tor i kierunek lotu. Jest również prawdopodobne, że w niektórych przypadkach intensywność światła uszkadza pigmenty wzrokowe, przez co oślepienie ptaki nie mogą dostrzec szczegółów otoczenia, które widzą w warunkach naturalnych [58].

Wieloletnie badania radarowe ptaków migrujących nocą w Stanach Zjednoczonych wykazały, że ptaki istotnie częściej wybierają na miejsce postoju siedliska w pobliżu najjaśniejszych punktów na mapie. Obszary silnie zanieczyszczone światłem reprezentują często siedliska w znacznym stopniu przekształcone przez człowieka, co może wpływać na mniejszą bazę żerowiskową dla ptaków migrujących. Biorąc pod uwagę, że wysokiej jakości siedlisko postoju z bogatymi żerowiskami ma kluczowe znaczenie dla udanej migracji, sztuczne oświetlenie może stanowić znaczący problem dla ochrony populacji ptaków wędrownych [59].

Natomiast analiza zasięgów geograficznych 298 migrujących gatunków ptaków wykazała, że zanieczyszczenie światłem jest największe w obszarach nocnych tras migracyjnych ptaków [60]. Inne badania także wskazują związek między sztucznym oświetleniem a większą liczbą ptaków lecących nocą podczas jesiennej migracji, zarówno nad granicami, jak i centrami miast [61]. Zanieczyszczenie sztucznym światłem ma także wpływ na skład gatunkowy migrujących ptaków. Badania w miastach wykazały, że ALAN latem oraz zimą, czyli w okresach najstabszej migracji, jest związany z mniejszą liczbą gatunków ptaków, natomiast wiosną i jesienią wykazano silną korelację między zanieczyszczeniem światłem a większą liczbą gatunków migrujących [62]. Wyniki te sugerują, że ALAN może wpływać zarówno na intensywność przelotu, jak i na skład gatunkowy ptaków podczas migracji, czyli w trakcie najbardziej krytycznego etapu ich rocznego cyklu.

Nawet w centrach miast leżących na szlaku migracyjnym, miejsca najsilniej oświetlone w istotny sposób zaburzają przelot ptaków. Jednym z najbardziej znanych przykładów jest coroczny memoriał ku czci ofiar zamachu na World Trade Center. Z tej okazji na głównym szlaku migracyjnym wschodniego wybrzeża Stanów Zjednoczonych, przy ujściu rzeki Hudson na Manhattanie, tworzona jest instalacja artystyczna składająca się z kilkudziesięciu reflektorów emitujących niebieskie światło, skierowane pionowo w górę. Badania prowadzone przez 7 lat każdego 11 września wykazały, że instalacja oświetleniowa wpłynęła na zmiany behawioralne około 1,1 mln ptaków. Kiedy reflektory były włączone, ptaki gromadziły się nawet w dwudziestokrotnie większym zagęszczeniu niż w sąsiadującym obszarze. Ponadto, wpadając w snop światła zmniejszały prędkość i zmieniały tor lotu na kołowy oraz znacznie częściej się odzywały. Zaburzenia behawioralne zniknęły po wyłączeniu reflektorów [63]. Wyniki te sugerują, że selektywne wyłączanie opraw oświetleniowych w nocy na szlakach migracji jest realną strategią minimalizowania potencjalnie śmiertelnych skutków oddziaływania zanieczyszczenia sztucznym światłem na ptaki.

Inne badania dowodzą natomiast, że stymulowane sztucznym światłem odzywające się ptaki mogą być ważnym predyktorem ryzyka śmiertelnej kolizji z budynkami. Wykazano, że ptaki komunikujące się ze sobą głosowo w trakcie nocnej migracji zderzają się znacząco częściej z elementami antropogenicznej infrastruktury niż ptaki, które z takiego rodzaju komunikacji nie korzystają. Badacze sugerują, że silniejsza reakcja na światło u ptaków posługujących się głosami kontaktowymi w locie może tłumaczyć różnice w kolizyjności [64]. Głosy kontaktowe wydawane przez lecące ptaki w nocy prawdopodobnie wyewoluowały, aby ułatwić wspólne podejmowanie decyzji

podczas migracji, ale to samo zachowanie społeczne może teraz zwiększać podatność na rozległe antropogeniczne zakłócenia.

W przypadku migracji nie tylko samo światło, ale także jego barwa odgrywa istotną rolę. W Chinach przeprowadzono badania nad wpływem barwy światła na migrujące ptaki, gdzie zastosowano źródła światła o czterech różnych barwach (niebieska, zielona, żółta i czerwona), przy których rozstawiono sieci ornitologiczne do łapania ptaków. Najwięcej ptaków wpadało w sieci wyposażone w lampy o barwie niebieskiej. Efekt ten był potęgowany przy złych warunkach atmosferycznych, takich jak mgła i silny wiatr [65]. W przytoczonych badaniach światło czerwone okazało się mieć najsłabsze oddziaływanie na ptaki.

Nie potwierdzają tego jednak wyniki z badań nad kolizyjnością ptaków z wieżami komunikacyjnymi [66]. Wykazano w nich, że stale załączone czerwone światło odpowiadało za największą kolizyjność ptaków w trakcie migracji. Usunięcie go i zastąpienie migającym światłem czerwonym może zmniejszyć śmiertelność od 50% do 71%. W dobie wzrastającego zanieczyszczenia światłem należy rozważyć stosowanie opraw emitujących oświetlenie o dłuższej fali, a w przypadkach ochrony wysokich konstrukcji przed kolizjami z ptakami najlepiej zastosować migające czerwone światło. Takie rozwiązania są już stosowane w wielu miejscach przy oświetlaniu kominów czy elektrowni wiatrowych.

### 3.8. Śpiew

Wiosenny śpiew ptaków jest ważnym elementem w cyklu rozrodczym, oznajmającym rozpoczęcie sezonu lęgowego. Za jego pośrednictwem ptaki poszukują partnera do rozrodu i oznajmiają zajęcie terytorium. Tak jak dojrzewanie gonad, tak też śpiew godowy jest stymulowany hormonalnie, zatem zanieczyszczenie sztucznym światłem także może wpływać istotnie na termin i godzinę ptasiego chóru. U ptaków naturalnie rozpoczynających śpiew jeszcze przed lub o świcie wykazano, że ALAN istotnie przyspiesza poranną wokalizację [20, 22, 67] jednocześnie znacząco wydłużając aktywność ptaków w ciągu doby, co może przekładać się na ich kondycję [24, 25, 68]. Ponadto wykazano także, że ekspozycja na światło w nocy, może także przyspieszyć rozpoczęcie wiosennego śpiewu w ciągu roku, co także może mieć wpływ na termin przystąpienia do lęgów [22].

### 3.9. Żerowanie

Zanieczyszczenie sztucznym światłem może także bezpośrednio wpływać na żerowanie. Światło w nocy przyciąga różne grupy organizmów, na czym mogą korzystać także ptaki. Wykazano, że ALAN może w istotny sposób wpływać na sposób i porę żerowania u wielu gatunków tych kręgowców. Zaobserwowano ptaki o typowo dziennej aktywności – mewy południowe *Larus dominicanus* – gromadzące się wieczorami na dachach budynków wokół oświetlonego tartaku. Okazało się, że ptaki żerowały przy latarniach na przyciąganych do światła rojących się chrząszczach

z rodziny kózkowatych [69]. Wykorzystywanie światła do polowania stwierdzono także u ptaków aktywnych o zmierzchu i nocą, tj. uszatki błotnej *Asio flammeus* oraz uszatki *Asio otus*. Sowy te żerowały na wędrujących ptakach nad oświetlonym Fortem Sagres w Portugalii. Punkt ten leży na jednym z najważniejszych szlaków migracyjnych między Europą a Afryką. Światło przyciągając ptaki migrujące mogło intensyfikować przelot w tym miejscu, dodatkowo zwiększając widoczność dla drapieżników [70]. ALAN wpływa także na żerowanie ptaków w mieście. Wykazano, że gołębie miejskie *Columba livia forma urbana* dzięki sztucznemu oświetleniu chętnie żerują nocą [71].

### 3.10. Kolizje i zaburzenie orientacji przestrzennej

Nocne światło przywabiając ptaki migrujące w tym okresie, naraża je na częstsze kolizje z budynkami i innymi obiektami antropogenicznymi. Badania nad Jeziorem Chicago dowodzą, że oświetlone budynki z dużą liczbą okien istotnie zwiększają odsetek śmiertelnych kolizji ptaków, szczególnie przy silnym wietrze. Wyniki tych badań sugerują, że zmniejszenie oświetlonej powierzchni budynków, szczególnie okolic okien, o połowę może znacząco obniżyć liczbę kolizji ptaków. Natomiast redukcja natężenia oświetlenia do wartości minimalnych stosowanych w przeszłości może zredukować śmiertelność ptaków o 60% [72]. Także badania rozpatrujące osobno oddziaływanie zanieczyszczenia światłem oraz zanieczyszczenia światłem spolaryzowanym PLP (ang. *polarized light pollution*) na kolizyjność ptaków z budynkami i szklanymi powierzchniami wykazały, że to właśnie ALAN w najsilniejszym stopniu odpowiada za śmiertelność ptaków. Dodatkowo jego wpływ był niezależny od rozmiaru szklanych powierzchni. Między PLP a kolizjami ptaków z budynkami nie stwierdzono związku [73].

Śmiertelnie niebezpieczne oddziaływanie ALAN nie dotyczy tylko drobnych ptaków w trakcie sezonowych migracji. Zjawisko to dotyka także duże ptaki morskie, zaburzając ich orientację w przestrzeni. Ptaki zdezorientowane zanieczyszczeniem światła, gubią prawidłową trasę lotu, kierując się w głąb lądu, gdzie często tracą życie na skutek śmiertelnej kolizji bądź z wycieńczenia lądują w niebezpiecznym miejscu, padając ofiarą drapieżników [74]. Zjawisko to jest szczególnie niebezpieczne dla młodych i niedoświadczonych ptaków, które po raz pierwszy pokonują trasę [75].

Młode burzyki żółtodziobe *Calonectris diomedea* z Wysp Kanaryjskich są narażone na negatywne konsekwencje zanieczyszczenia światłem także w momencie dyspersji polęgowej, gdy lotne ptaki opuszczają gniazda na lądzie, kierując się w stronę oceanu. Badania z wykorzystaniem nadajników GPS wykazały, że burzyki na skutek zanieczyszczenia światłem mają problem z opuszczeniem najbliższej okolicy gniazda i znalezieniem odpowiedniej drogi ku morzu, gdzie dorosłe ptaki spędzają większość swojego życia. Młode długo błędziły nad lądem, z wycieńczenia lądując w miejscach, gdzie były narażone na ataki drapieżników bądź śmiertelne kolizje. Połowa ptaków nie była w stanie oddalić się powyżej 3 km od kolonii, co w znacznym stopniu może zredukować liczbę ptaków, które osiągną dojrzałość płciową [76].

Natomiast wyniki badań nad burzykiem cienkodziobym *Ardena tenuirostris* przeprowadzonych na wyspie Phillip Island w Australii udowadniają, że redukcja oświetlenia znacząco zmniejszyła liczbę ptaków, które oszołomione lądowały na drodze, często tracąc życie pod kołami pojazdów [77]. Ponadto badania przeprowadzone kilka lat później wykazały, że nie tylko redukcja, ale także zmiana oświetlenia może znacząco zmniejszyć negatywne oddziaływanie ALAN na ptaki morskie. W porównaniu ze źródłami LED oraz wysokoprężnymi lampami metalohalogenkowymi, wysokoprężne lampy sodowe miały najmniejsze negatywne oddziaływanie na młode burzyki cienkodziobe w trakcie dyspersji polęgowej. Badacze zalecają instalowanie opraw oświetleniowych współpracujących z wysokoprężnymi lampami sodowymi w miejscach, gdzie ptaki rurkonose *Procellariiformes* zakładają kolonie lęgowe [78].

### 3.11. Zmiany zasięgów występowania

Poza bezpośrednim szkodliwym oddziaływaniem zanieczyszczenia światłem na ptaki, ALAN może być także istotnym czynnikiem środowiskowym limitującym zasięgi niektórych gatunków. Doskonałym przykładem jest lelek *Caprimulgus europaeus* – gatunek ptaka o typowo nocnej aktywności, którego populacja w szwajcarskich Alpach w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat znacząco spadła. Lelki są bardzo wrażliwe na światło ze względu na przystosowanie siatkówki do funkcjonowania w półmroku. Badania nad siedliskiem oraz bazą pokarmową wskazują, że głównym powodem ustępowania lelka z obszaru Valais jest rosnąca emisja światła, która już przekroczyła poziom adaptacyjny tego gatunku [79].

Także modelowanie matematyczne przeprowadzone na podstawie wyników Monitoringu Pospolitych Ptaków Polski wskazuje, że dzięcioł czarny *Dryocopus martius* może być kolejnym gatunkiem, którego zasięgi są znacznie ograniczane przez zanieczyszczenie światłem [80]. Wykazano także, że wraz ze wzrostem ALAN spada różnorodność gatunkowa ptaków lęgowych [81]. Natomiast w przypadku zgrupowań ptaków zimujących w mieście, w przeciwieństwie do hałasu, zanieczyszczenie światłem wpływało pozytywnie, zwiększając ptasie zbiorowiska i ich stabilność międzysezonową [82].

## 4. Podsumowanie

Sztuczne oświetlenie jest jednym z najczęściej nadużywanych dóbr cywilizacyjnych, które w znacznym stopniu oddziałuje na środowisko naturalne. Zanieczyszczenie światłem jest jednym z głównych czynników istotnie zmniejszających bioróżnorodność na świecie [83]. W znacznym stopniu wpływa też na ptaki, zaburzając ich cykle dobowe i roczne, zmieniając terminy rozmnażania, upośledzając odporność organizmu czy zwiększając liczbę śmiertelnych kolizji. Mimo że wiele aspektów oddziaływań zostało zbadanych, wciąż nasza wiedza dotycząca oddziaływania tego czynnika na ptaki jest ograniczona.

Ze względu na rosnącą skalę zjawiska, należy podjąć wszelkie działania, aby w rozsądnym zakresie ograniczyć jego emisję, jednocześnie nie wpływając na bezpieczeństwo ludzi. Pod kątem oddziaływania na ptaki, w pierwszej kolejności redukcję emisji ALAN należy wprowadzić w miejscach newralgicznych dla ptaków, jakimi są korytarze migracyjne oraz obszary sąsiadujące z koloniami lęgowymi szczególnie wrażliwych ptaków. W dobie wprowadzanego na coraz szerszą skalę oświetlenia LED, problem wpływu zanieczyszczenia sztucznym światłem nabiera także innego charakteru. Nowoczesne technologie implementowane w oprawach drogowych coraz częściej wykorzystują diody elektroluminescencyjne emitujące światło białe, ze względu m.in. na lepsze właściwości oddawania barw i dużą skuteczność świetlną. Promieniowanie emitowane przez źródła LED zawiera duży komponent światła niebieskiego, które ze względu na wysoką czułość podwzgórza i szyszynki, może być szczególnie niebezpieczne dla ptaków. Naukowcy sugerują, że zmiana oświetlenia zewnętrznego z białego na bursztynowe może przynieść znaczące korzyści wielu dzikim zwierzętom [84]. Ograniczanie emisji światła w nocy powinno stać się ważnym celem polityki ekologicznej najbardziej rozwiniętych państw na świecie, stając się istotnym narzędziem do poprawy perspektywy ochrony wielu gatunków zwierząt.

## Literatura

- [1] Dunlap J.C., *Molecular bases for circadian clocks*, Cell, 1999, 96, s. 271–290.
- [2] Gwinner E., Brandstätter R., *Complex bird clock*, Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2001, 356, s. 1801–1810, DOI: 10.1098/rstb.2001.0959.
- [3] Gwinner E., *Circannual rhythms*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1986, s. 1–9.
- [4] Squires W.A., Hanson H.E., *The Destruction of Birds at the Lighthouses on the Coast of California*, The Condor, 1918, 20(1), s. 6–10, DOI: 10.2307/1362354.
- [5] Johnston D.W., Haines T.P., *Mass bird mortality*, Auk, 1957, 74, s. 447–458.
- [6] Gaston, K.J., Visser, M.E., Holker, F., *The biological impacts of artificial light at night: the research challenge*, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 370(1667), art. 20140133, DOI: 10.1098/rstb.2014.0133.
- [7] Dominoni D.M., *The effects of light pollution on biological rhythms of birds: an integrated, mechanistic perspective*, Journal of Ornithology, 2015, 156(1 Supplement), s. 409–418, DOI:10.1007/s10336-015-1196-3.
- [8] Doyle S., Menaker M., *Circadian photoreception in vertebrates*, Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 2007, 72(1), s. 499–508, DOI: 10.1101/sqb.2007.72.003.
- [9] Bellingham J., Chaurasia S.S., Melyan Z. et al., *Evolution of melanopsin photoreceptors: discovery and characterization of a new melanopsin in nonmammalian vertebrates*, PLoS Biology, 2006, 4(8), s. 1334–1343, DOI:10.1371/journal.pbio.0040254.
- [10] Max M., McKinnon P., Seidenman K. et al., *Pineal opsin: a nonvisual opsin expressed in chick pineal*, Science, 1995, 267, s. 1502–1506, DOI:10.1126/science.7878470.

- [11] Halford S., Pires S.S., Turton M. et al., *VA Opsin-Based Photoreceptors in the Hypothalamus of Birds*, *Current Biology*, 2009 19(16), s. 1396–1402, DOI: 10.1016/j.cub.2009.06.066.
- [12] Gwinner E., Hau M., Heigl S., *Melatonin: generation and modulation of avian circadian rhythms*, *Brain Research Bulletin*, 1997, 44(4), s. 439–444, DOI:10.1016/s0361-9230(97)00224-4.
- [13] Dunn P.O., Møller A.P., *Changes in breeding phenology and population size of birds*, *Journal of Animal Ecology*, 2014, 83(3), s. 729–739, DOI: 10.1111/1365-2656.12162.
- [14] Cotton P.A., *Avian migration phenology and global climate change*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(21), 12219–12222, DOI: 10.1073/pnas.1930548100.
- [15] Ubuka, T., Bentley, G.E., Tsutsui, K., *Neuroendocrine regulation of gonadotropin secretion in seasonally breeding birds*, *Frontiers in Neuroscience*, 2013, 7(38), s. 1–17, DOI: 10.3389/fnins.2013.00038.
- [16] Bentley, G.E., Van't Hof T.J., Ball G.F., *Seasonal neuroplasticity in the songbird telencephalon: A role for melatonin*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 199996(8), s. 4674–4679, DOI: 10.1073/pnas.96.8.4674.
- [17] Cassone V.M., Bartell P.A., Earnest B.J. et al., *Duration of Melatonin Regulates Seasonal Changes in Song Control Nuclei of the House Sparrow, *Passer domesticus*: Independence from Gonads and Circadian Entrainment*, *Journal of Biological Rhythms*, 2008, 23(1), s. 49–58, DOI: 10.1177/0748730407311110.
- [18] Tsutsui K., Ubuka T., Yin H. et al., *Mode of action and functional significance of avian gonadotropin-inhibitory hormone (GnIH): a review*, *Journal of Experimental Zoology*, 2006, 305A, s. 801–806, DOI: 10.1002/jez.aa.
- [19] Foster R.G., Kreitzmann L., *Rhythms of life: the biological clocks that control the daily lives of every living thing*, Yale University Press, New Haven, 2004.
- [20] Da Silva A., Samplonius J.M., Schlicht E. et al., *Artificial night lighting rather than traffic noise affects the daily timing of dawn and dusk singing in common European songbirds*, *Behavioral Ecology*, 2014, 25(5), s. 1037–1047, DOI:10.1093/beheco/aru103.
- [21] Kempnaers B., Borgström P., Loës P. et al., *Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds*, *Current Biology*, 2010, 20(19), ss. 1735–1739, DOI: 10.1016/j.cub.2010.08.028.
- [22] Da Silva A., Valcu M., Kempnaers B., *Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370(1667), art. 20140126, DOI: 10.1098/rstb.2014.0126.
- [23] Schlicht L., Valcu M., Loes P., et al., *No relationship between female emergence time from the roosting place and extrapair paternity*, *Behavioral Ecology*, 2014, 25(3), s. 650–659, DOI: 10.1093/beheco/aru035.
- [24] Dominoni D.M., Carmona-Wagner E.O., Hofmann M. et al., *Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds*, *Journal of Animal Ecology*, 2014, 83(3), s. 681–692, DOI: 10.1111/1365-2656.12150.
- [25] Dominoni D.M., Partecke J., *Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging European blackbirds (*Turdus merula*)*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370(1667), art. 20140118, DOI: 10.1098/rstb.2014.0118.



- [26] Xie L., Kang H., Xu Q. et al., *Sleep Drives Metabolite Clearance from the Adult Brain*, Science, 2013, 342(6156), s. 373–377, DOI:10.1126/science.1241224.
- [27] Pandi-Perumal S.R., Srinivasan V., Maestroni G.J.M., et al., *Melatonin: Nature's most versatile biological signal?*, FEBS Journal, 2006, 273, s. 2813–2838, DOI: 10.1111/j.1742-4658.2006.05322.x.
- [28] Dominoni D.M., Goymann W., Helm B. et al., *Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (Turdus merula): implications of city life for biological time-keeping of songbirds*, Frontiers in Zoology, 2013, 10(1), s. 60, DOI: 10.1186/1742-9994-10-60.
- [29] De Jong M., Jeninga L., Ouyang J. et al., *Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night*, Physiology & Behavior, 2016, 155, s. 172–179, DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.12.0.
- [30] Sun J., Raap T., Pinxten R. et al., *Artificial light at night affects sleep behaviour differently in two closely related songbird species*, Environmental Pollution, 2017, 231, s. 882–889, DOI: 10.1016/j.envpol.2017.08.098.
- [31] Raap T., Pinxten R., Eens M., *Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (Parus major) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound*, Environmental Pollution, 2016, 215, s. 125–134, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.100.
- [32] Aulsebrook A.E., Connelly F., Johnsson R.D. et al., *White and Amber Light at Night Disrupt Sleep Physiology in Birds*, Current Biology, 2020, 30, s. 3657–3663, DOI: 10.1016/j.cub.2020.06.085.
- [33] Alaasam V.J., Duncan R., Casagrande S. et al., *Light at night disrupts nocturnal rest and elevates glucocorticoids at cool color temperatures*, Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2018, s. 1–8, DOI: 10.1002/jez.2168.
- [34] Aulsebrook A.E., Lesku J.A., Mulder R.A. et al., *Streetlights Disrupt Night-Time Sleep in Urban Black Swans*, Frontiers in Ecology and Evolution, 2020, 8, art. 131, DOI: 10.3389/fevo.2020.00131.
- [35] Malek I., Haim A., Izhaki I., *Melatonin mends adverse temporal effects of bright light at night partially independent of its effect on stress responses in captive birds*, Chronobiology International, 2019, s. 1–20, DOI: 10.1080/07420528.2019.16985.
- [36] Russ A., Reitemeier S., Weissmann A. et al., *Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine*, Ecology and Evolution, 2015, 5(23), s. 5698–5710, DOI: 10.1002/ece3.1820.
- [37] Grunst M.L., Raap T., Grunst A.S. et al., *Early-life exposure to artificial light at night elevates physiological stress in free-living songbirds*, Environmental Pollution, 2019, 259, art. 113895, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.11389.
- [38] Moaraf S., Vistorovsky Y., Pozner T. et al., *Artificial light at night affects brain plasticity and melatonin in birds*, Neuroscience Letters, 2019, art. 134639, DOI: 10.1016/j.neulet.2019.13463.
- [39] Moaraf S., Heiblum R., Vistorovsky Y. et al., *Artificial Light at Night Increases Recruitment of New Neurons and Differentially Affects Various Brain Regions in Female Zebra Finches*, International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(17), 6140, DOI: 10.3390/ijms21176140.
- [40] Malik I., Batra T., Das S., et al., *Light at night affects gut microbial community and negatively impacts host physiology in diurnal animals: Evidence from captive zebra finches*, Microbiological Research, 2020, art. 126597, DOI: 10.1016/j.micres.2020.12659.

- [41] Raap T., Casasole G., Costantini D. et al., *Artificial light at night affects body mass but not oxidative status in free-living nestling songbirds: an experimental study*, Scientific Reports, 2016, 6(1), DOI: 10.1038/srep35626.
- [42] Ulgezen Z.N., K p yl  T., Meerlo P. et al., *The preference and costs of sleeping under light at night in forest and urban great tits*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2019, 286(1905), art. 20190872, DOI: 10.1098/rspb.2019.0872.
- [43] Jiang J., He Y., Kou H., et al., *The effects of artificial light at night on Eurasian tree sparrow (Passer montanus): Behavioral rhythm disruption, melatonin suppression and intestinal microbiota alterations*, Ecological Indicators, 2020, 108, art. 105702, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.1057.
- [44] Sepp T., Webb E., Simpson R.K., et al., *Light at night reduces digestive efficiency of developing birds: an experiment with king quail*, The Science of Nature, 2021, 108(1), DOI: 10.1007/s00114-020-01715-9.
- [45] Ziegler A.K., Watson H., Hegemann A. et al., *Exposure to artificial light at night alters innate immune response in wild great tit nestlings*, The Journal of Experimental Biology, 2021, 224, DOI: 10.1242/jeb.239350.
- [46] Arjona A., Silver A.C., Walker W.E., *Immunity's fourth dimension: approaching the circadian-immune connection*, Trends in Immunology, 2012, 33(12), s. 607–612, DOI: 10.1016/j.it.2012.08.007.
- [47] Becker D.J., Singh D., Pan Q. et al., *Artificial light at night amplifies seasonal relapse of haemosporidian parasites in a widespread songbird*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2020, 287(1935), art. 20201831, DOI: 10.1098/rspb.2020.1831.
- [48] Kernbach M.E., Newhouse D.J., Miller J.M. et al., *Light pollution increases West Nile virus competence of a ubiquitous passerine reservoir species*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2019, 286(1907), 20191051, DOI: 10.1098/rspb.2019.1051.
- [49] Dominoni D.M., Quetting M., Partecke J., *Artificial light at night advances avian reproductive physiology*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2013280(1756), art. 20123017, DOI: 10.1098/rspb.2012.3017.
- [50] Dominoni D.M., Quetting M., Partecke J., *Long-Term Effects of Chronic Light Pollution on Seasonal Functions of European Blackbirds (Turdus merula)*, PLoS ONE, 2013, 8(12), e85069, DOI: 10.1371/journal.pone.008506.
- [51] Russ A., Lu eni ov  T., Klenke R., *Altered breeding biology of the European blackbird under artificial light at night*, Journal of Avian Biology, 2017, 48(8), s. 1114–1125, DOI: 10.1111/jav.01210.
- [52] Dominoni D.M., de Jong M., Bellingham M., et al., *Dose-response effects of light at night on the reproductive physiology of great tits (Parus major): Integrating morphological analyses with candidate gene expression*, Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2010, a. 1–15, DOI: 10.1002/jez.2214.
- [53] Singh D., Montoure J., Ketterson E.D., *Exposure to artificial light at night accelerates but does not override latitude-dependent seasonal reproductive response in a North American songbird*, Environmental Pollution, 2021, 279, art. 116867, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.11686.
- [54] De Jong M., Ouyang J.Q., Da Silva A. et al., *Effects of nocturnal illumination on life-history decisions and fitness in two wild songbird species*, Philosophical Transactions of

- the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 370(1667), art. 20140128, DOI: 10.1098/rstb.2014.0128.
- [55] Davies W.I.L., Turton M., Peirson S.N. et al., (*Vertebrate ancient opsin photopigment spectra and the avian photoperiodic response*, Biology Letters, 2011, 8(2), s. 291–294, DOI: 10.1098/rsbl.2011.0864.
- [56] Caro S.P., Schaper S.V., Hut R.A. et al., *The Case of the Missing Mechanism: How Does Temperature Influence Seasonal Timing in Endotherms?*, PLoS Biology, 2013, 11(4), e1001517, DOI: 10.1371/journal.pbio.100151.
- [57] Smith R.A., Gagné M., Fraser K.C., *Pre-migration artificial light at night advances the spring migration timing of a trans-hemispheric migratory songbird*, Environmental Pollution, 2020, art. 116136, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.11613.
- [58] Gauthreaux S., Belser C.G., *Effects of artificial night lighting on migrating birds*, Ecological Consequences of Artificial Night Lighting, 2006, s. 67–93.
- [59] McLaren J.D., Buler J.J., Schreckengost T. et al., *Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds*, Ecology Letters, 2018, 21(3), s. 356–364, DOI: 10.1111/ele.12902.
- [60] Cabrera–Cruz C., Smolinsky S., *Artificial Light at Night is Related to Broad–Scale Stopover Distributions of Nocturnally Migrating Landbirds along the Yucatan Peninsula, Mexico*, Remote Sensing, 2020, 12(3), 395, DOI: 10.3390/rs12030395.
- [61] La Sorte F.A., Fink D., Buler J.J. et al. *Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations*, Global Change Biology, 2017, 23(11), s. 4609–4619, DOI: 10.1111/gcb.13792.
- [62] La Sorte F.A., Horton K.G., *Seasonal variation in the effects of artificial light at night on the occurrence of nocturnally migrating birds in urban areas*, Environmental Pollution, 2020, art. 116085, DOI:10.1016/j.envpol.2020.11608.
- [63] Van Doren B.M., Horton K.G., Dokter A.M. et al., *High–intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(42), s. 11175–11180, DOI:10.1073/pnas.1708574114.
- [64] Winger B.M., Weeks B.C., Farnsworth A. et al., *Nocturnal flight–calling behaviour predicts vulnerability to artificial light in migratory birds*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2019, 286(1900), art. 20190364, DOI: 10.1098/rspb.2019.0364.
- [65] Zhao X., Zhang M., Che X., et al., *Blue light attracts nocturnally migrating birds*, The Condor, 2020, DOI: 10.1093/condor/duaa002.
- [66] Gehring J., Kerlinger P., Manville A.M., *Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions*, Ecological Applications, 2009, 19(2), s. 505–514, DOI: 10.1890/07–1708.1.
- [67] Da Silva A., Valcu M., Kempenaers B., *Behavioural plasticity in the onset of dawn song under intermittent experimental night lighting*, Animal Behaviour, 2016, 117, s. 155–165, DOI: 10.1016/j.anbehav.2016.05.001.
- [68] Dominoni D.M., Smit J.A.H., Visser M.E. et al., *Multisensory pollution: Artificial light at night and anthropogenic noise have interactive effects on activity patterns of great tits (Parus major)*, Environmental Pollution, 2019, art. 113314, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.11331.
- [69] Pugh A., Pawson S., *Artificial light at night potentially alters feeding behaviour of the native southern black–backed gull (Larus dominicanus)*, Notornis, 2016, 63.

- [70] Canário F., HespanholLeitão A., Tomé R., *Predation Attempts by Short-eared and Long-eared Owls on Migrating Songbirds Attracted to Artificial Lights*, Journal of Raptor Research, 2012, 46(2), s. 232–234, DOI: 10.3356/jrr-11–15.
- [71] Leveau LM., *Artificial Light at Night (ALAN) Is the Main Driver of Nocturnal Feral Pigeon (Columba livia f. domestica) Foraging in Urban Areas*, Animals, 2020, 10(4), s. 554, DOI: 10.3390/ani10040554.
- [72] Van Doren B.M., Willard D.E., Hennen M. et al., *Drivers of fatal bird collisions in an urban center Benjamin*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118 (24) e2101666118, DOI: 10.1073/pnas.2101666118.
- [73] Lao S., Robertson B.A., Anderson A.W. et al., *The influence of artificial night at night and polarized light on bird–building collisions*, Biological Conservation, 2020, 241, 108358, DOI: 10.1016/j.biocon.2019.108358.
- [74] Rodríguez A., Rodríguez B., Curbelo Á.J. et al., *Factors affecting mortality of shearwaters stranded by light pollution*, Animal Conservation, 2012, 15(5), s. 519–526, DOI: 10.1111/j.1469–1795.2012.00.
- [75] Atchoi E., Mitkus M., Rodríguez A., *Is seabird light-induced mortality explained by the visual system development?*, Conservation Science and Practice, 2020, 2(6), DOI: 10.1111/csp2.195.
- [76] Rodríguez A., Rodríguez B., Negro J.J., *GPS tracking for mapping seabird mortality induced by light pollution*, Scientific Reports, 2015, 5(1), DOI: 10.1038/srep10670.
- [77] Rodríguez A., Burgan G., Dann P. et al., *Fatal Attraction of Short-Tailed Shearwaters to Artificial Lights*, PLoS ONE, 2014, 9(10), e110114, DOI: 10.1371/journal.pone.011011.
- [78] Rodríguez A., Dann P., Chiaradia A., *Reducing light-induced mortality of seabirds: High pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters*, Journal for Nature Conservation, 2017, 39, s. 68–72, DOI: 10.1016/j.jnc.2017.07.001.
- [79] Sierro A, Erhardt A., *Light pollution hampers recolonization of revitalised European Nightjar habitats in the Valais (Swiss Alps)*, Journal of Ornithology, 2019, DOI: 10.1007/s10336–019–01659–6.
- [80] Kosicki J.Z., *Anthropogenic activity expressed as “artificial light at night” improves predictive density distribution in bird populations*, Ecological Complexity, 2020, 41, 100809, DOI: 10.1016/j.ecocom.2019.100809
- [81] Kosicki J.Z., *The impact of artificial light at night on taxonomic, functional and phylogenetic bird species communities in a large geographical range: A modelling approach*, Science of The Total Environment, 2021, 780, 146434, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146.
- [82] Ciach M., Fröhlich A., *Habitat type, food resources, noise and light pollution explain the species composition, abundance and stability of a winter bird assemblage in an urban environment*, Urban Ecosystems, 2016, 20(3), s. 547–559, DOI: 10.1007/s11252–016–0613–6.
- [83] Hölker F., Wolter C., Perkin E.K. et al., *Light pollution as a biodiversity threat*, Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(12), s. 681–682, DOI: 10.1016/j.tree.2010.09.007.
- [84] Longcore T., Rodríguez A., Witherington B. et al., *Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night*, Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2018, 1–11, DOI: 10.1002/jez.2184.

## THE EFFECTS OF LIGHT POLLUTION ON BIRDS

**Abstract:** Artificial lighting is one of the most abused benefits of civilization, which significantly affects the natural environment. Birds' daily and annual activities are strongly regulated by sunlight. They possess a wide range of photoreceptors located in several tissues in the brain, not only in the retina, which makes them particularly sensitive to light. For this reason, ecological light pollution significantly disrupts their natural rhythms. Research provides that exposure to light at night affects sleeping behaviour, breeding, fitness, metabolism, immunity, stress, migration, and many other aspects of birds' life. Light is also one of the factors significantly increasing bird mortality, as well as limiting the ranges of their occurrence. This proves how important it is to reduce the emission of artificial light pollution, which is one of the greatest threats to biodiversity in the world.

**Keywords:** birds, light pollution, circadian rhythms, annual rhythms, mortality

# ROZŚWIETLONA NOC, JASNE ZAGROŻENIE DLA PRZYRODY – WPŁYW ALAN NA PTAKI MIGRUJĄCE

**Lucyna Pilacka**

Stowarzyszenie Wspierania Inwestycji Przyjaznych PTA.com  
biuro.swipp@gmail.com

**Liliana Schönberger**

Gentoo Consulting

**Aleksandra Szurlej-Kiełańska**

Stowarzyszenie Wspierania Inwestycji Przyjaznych PTA.com

**Streszczenie:** Negatywne oddziaływanie sztucznego oświetlenia (*Artificial Light at Night* – ALAN) jest jedną z głównych, antropogenicznych przyczyn odpowiedzialnych za bezpośrednią śmiertelność ptaków migrujących nocą. Do udokumentowanego, negatywnego wpływu ALAN na ptaki zaliczane są: efekt przyciągania i efekt dezorientacji. Efekt bariery z kolei jest przedmiotem badań, jednak brakuje jak dotąd jednoznacznego stwierdzenia na temat charakteru tego zjawiska. Większość badań wskazuje, że za efekt przyciągania, przyczyniający się do kolizji z różnymi konstrukcjami na lądzie i na morzu, odpowiedzialne jest oświetlenie o barwie niebieskiej i zielonej. Jednak czerwone i białe światło również wskazywane było w badaniach jako wywierające wpływ na przyciąganie ptaków. Z uwagi na te rozbieżności, konieczne są dalsze badania, w efekcie których będzie możliwe określenie, jaka barwa światła będzie najbezpieczniejsza dla ptaków. W chwili obecnej zasadne wydaje się rekomendowanie wykorzystania źródeł światła o barwach ciepłych (żółtej, bursztynowej) o temperaturze barwowej nieprzekraczającej 3000 K.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie sztucznym światłem, ptaki migrujące, ochrona ptaków, kolizje ptaków, śmiertelność ptaków

## 1. Wstęp

Funkcjonowanie organizmów żywych, zarówno roślin, jak i zwierząt, ściśle związane jest z dobowym i sezonowym rytmem naturalnego światła. Szeroko pojęty rozwój cywilizacyjny, szczególnie na terenach silnie zurbanizowanych, stanowi jedno z głównych źródeł zanieczyszczenia środowiska, w tym zanieczyszczenia związanego ze sztucznym oświetleniem. Szacuje się, że obecnie jedynie około 18% powierzchni kontynentalnej Ziemi oświetlone jest światłem pochodzenia naturalnego [1]. W Europie nie ma już praktycznie żadnych miejsc, gdzie światło w nocy pochodzi tylko od blasku ciał niebieskich. Ostatnie ostoje naturalnie ciemnej nocy najbliższej Polski to północna Szkocja i wschodnia Ukraina, a blisko 1/3 całkowitej populacji ludzkiej zamieszkującej nasz glob utraciła możliwość obserwacji Drogi Mlecznej [1].

Wyniki wielu badań jednoznacznie wskazują, że nadmiar sztucznego oświetlenia, niezależnie od barwy czy długości fali, negatywnie wpływa na wszystkie organizmy żywe. Światło niebieskie zaburza wydzielanie melatoniny, wpływając w konsekwencji na rytm dobowy, behavior, cykl rozrodczy czy naturalne interakcje wewnątrz – i międzygatunkowe u lokalnie występujących ptaków, ssaków i ryb [2, 3, 4, 5]. Nie bez znaczenia jest również wpływ ALAN (ang. *Artificial Light at Night*) na lokalne rozmieszczenie, aktywność i skład gatunkowy innych gatunków zwierząt (ssaków, gadów, płazów, ryb, bezkręgowców) oraz roślin stanowiących pokarm czy siedlisko dla ptaków [6, 7, 8]. Skomplikowany obraz zależności i wzajemnych oddziaływań pomiędzy organizmami żywymi a środowiskiem, w którym żyją, obrazuje jak wrażliwy jest to mechanizm i jak negatywny wpływ jednego czynnika na jeden gatunek czy populację może w konsekwencji wpłynąć na inne, na różnych poziomach współzależności.

Obecnie, prowadzi się wiele badań dokumentujących zmiany, jakie powoduje długotrwała ekspozycja na ALAN w przypadku populacji lęgowych ptaków. Wiemy jednak, że negatywny wpływ nadmiaru sztucznego światła dotyczy także ptaków migrujących nocą z lęgowisk na zimowiska (migracja jesienna) oraz z zimowisk na lęgowiska (migracja wiosenna) i stanowi jedną z głównych przyczyn bezpośredniej śmiertelności ptaków na skutek działalności człowieka. Przywabione i zdezorientowane światłami miast ptaki, krążąc wokół takich punktów, w efekcie często rozbijają się o budynki i inne elementy infrastruktury. Monitoring śmiertelności prowadzony w Minneapolis (USA) wykazał, że liczba znalezionych martwych ptaków była wyższa przy budynkach silniej oświetlonych [9] co wskazuje istotny wpływ ALAN na prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji. Dodatkowo, przy niekorzystnych warunkach pogodowych, gdy naturalne „drogowskazy” zasłonięte są przez chmury czy mgłę, migrujące ptaki zmuszone są obniżyć pułap lotu, co również często skutkuje śmiertelnymi kolizjami z oświetloną, gęstą zabudową w centrach miast.

Zjawisko przyciągania ptaków przez sztuczne światło obserwowano już w XIX wieku i dotyczyło ono w głównej mierze latarni morskich i oświetlonych punktowo statków [10]. Na tej podstawie zaobserwowano również zmienność skali śmiertelności migrujących ptaków w zależności od lokalizacji latarni, co w dalszej kolejności

pozwoiliło m.in. na wyodrębnienie ważniejszych szlaków migracyjnych [11, 12]. Obecnie, pomimo że zjawisko kolizji ptaków z oświetlonymi elementami infrastruktury rzadko dotyczy latarni morskich, termin określany właśnie „efektem latarni morskiej” nadal funkcjonuje i wymieniany jest poza efektem przezroczystości i efektem lustra, jako jedna z przyczyn kolizji ptaków z przeszkleniami [13]. W związku z dynamicznym rozwojem obszarów zurbanizowanych i przeważającym wpływem ALAN związanym z oświetlonymi, rozległymi obszarami miejskimi, sugerujemy zastąpienie powyższego sformułowanie, terminem „efektu kopuły”, znacznie precyzyjniej obrazującym aktualne zagrożenia. Sformułowanie zawierające słowo „kopuła”, bezpośrednio odnosi się do kształtu, jakiego przybiera tona świetlna nad miastami (w przeciwieństwie do punktowego, pulsującego oświetlenia latarni morskiej).

Przywabione sztucznym światłem i zdezorientowane ptaki często ulegają kolizjom z różnymi elementami infrastruktury (budynki, wieże telekomunikacyjne, przewody elektryczne itp.) lub padają z wyczerpania, krążąc wokół punktów świetlnych. Ostatnie badania wykazały, że niektóre grupy gatunków migrujących nocą częściej ulegają kolizjom i są bardziej podatne na negatywne efekty związane z ALAN [14]. W wyniku analiz danych zebranych w trakcie 40-letniego monitoringu śmiertelności ptaków w Chicago i Cleveland wykazano, że największy udział wśród ofiar kolizji miały gatunki ptaków, które regularnie odzywają się podczas nocnej migracji i intensywnie komunikują się z innymi osobnikami w stadzie za pomocą krótkich głosów kontaktowych – są to głównie drozdy *Turdidae*, lasówki *Parulidae* i pasówki *Passerela* [15]. Ten sposób porozumiewania się podczas migracji pomaga stadu w nawigacji, orientacji i podejmowaniu wspólnych decyzji, jednak udowodniono, że zwiększa również ryzyko kolizji na skutek ALAN poprzez grupową dezorientację i przywabianie innych osobników. Okazuje się jednak, że inne gatunki ptaków, nieodzywające się podczas nocnych przelotów, nie były wrażliwe na te sygnały. Spośród gatunków występujących w Europie głosami kontaktowymi podczas nocnych przelotów posługują się m.in. drozdy *Turdus sp.*, zniczki *Regulus ignicapillus*, mysikróliki *Regulus regulus* [16] czy niektóre gatunki siewkowych Charadriiformes, co zdawałoby się potwierdzać powyższą teorię, gdyż przedstawiciele tych grup gatunków często stanowią wysoki odsetek ofiar kolizji (obserwacje własne – dane niepublikowane).

Pomimo rosnącej liczby dowodów na temat negatywnego wpływu zanieczyszczenia światłem na środowisko, całkowita powierzchnia Ziemi narażona jest na zanieczyszczenie światłem, a intensywność ALAN wzrasta w ciągłym tempie [17]. Miejskie źródła ALAN mają szeroki wpływ na zachowania migracyjne i mogą odgrywać rolę w kształtowaniu tras migracyjnych poszczególnych gatunków, co dodatkowo podkreśla potrzebę lepszego zrozumienia wpływu tego zjawiska na populacje ptaków wędrownych. Gatunki ptaków należące do migrantów długodystansowych, przemieszczających się nocą są bardziej narażone na negatywne oddziaływanie ALAN podczas migracji niż podczas innych faz cyklu rocznego (okres lęgowy, zimowanie). Największe koncentracje ALAN występują zazwyczaj na obszarach miejskich, które zajmują około 0,5% powierzchni lądów na świecie i są skoncentrowane głównie



między 30°N a 45°N [18]. Wiele gatunków nocnych migrantów rozmnaża się w lasach borealnych na północ od 50° szerokości geograficznej, na przykład na północ od granicy USA z Kanadą, a zimuje na obszarach tropikalnych na południe od Zwrotnika Raka (25°N). W związku z tym, podczas migracji ptaki te przemierzają szerokości geograficzne o najwyższym stopniu rozwoju urbanistycznego na świecie, wyruszając z obszarów o niskim poziomie zanieczyszczenia światłem i wracając do nich [19].

Z punktu widzenia ochrony ptaków migrujących istotne jest więc ograniczenie zanieczyszczenia światłem sztucznym, szczególnie w miejscach, które zanieczyszczenie to generują w najwyższym stopniu, a jednocześnie stanowią element sieci korytarzy ekologicznych o znaczeniu regionalnym i ponadregionalnym. Bazując na dostępnej wiedzy, możliwe jest wskazanie potencjalnie newralgicznych punktów na terenie Polski. Jednym z takich miejsc jest, między innymi, pas nadmorski w rejonie aglomeracji Trójmiasta czy dolina Odry w rejonie Wrocławia [13].

Pilotażowe badania, z wykorzystaniem radarów ornitologicznych wykazały, że w ciągu jednej nocy (październik 2018 roku) nad Gdańskiem przeleciało blisko 350 000 ptaków [20]. Jednocześnie, w okresie migracji jesiennej śmiertelność ptaków w wyniku kolizji z przeszkloną zabudową w obrębie Trójmiasta jest wyraźnie zauważalna, co potwierdzają obserwacje własne i doniesienia medialne. Powinno to więc stanowić przyczynek do dyskusji nad kierunkiem rozwoju zabudowy w rejonie pasa nadmorskiego, czy ograniczeniem ALAN w okresie intensywnej migracji ptaków, a także punkt wyjścia do dalszych badań.

## 2. Oddziaływanie ALAN na ptaki migrujące

Nie do końca znane są mechanizmy skutkujące przyciąganiem czy dezorientacją nocnych migrantów w wyniku oddziaływania sztucznych źródeł światła. Większość badań wskazuje pierwotnie na efekt związany z dodatnią fototaksją, czyli zjawiskiem reakcji przyciągania w kierunku bodźców świetlnych, co jest szczególnie silnie zaznaczone w przypadku ptaków obserwowanych podczas jesiennej migracji [21]. W dalszej kolejności, ptaki, które wpadną w „pułapkę świetlną” ulegają dezorientacji na skutek zaburzenia podstawowych mechanizmów orientacji w przestrzeni: nawigacji według planet i gwiazd oraz zdolności postrzegania pola magnetycznego [22]. Silne, rozproszone sztuczne światło zaburza absorpcję naturalnego światła przez białko fotoreceptorowe znajdujące się w siatkówce (rodopsynę), co w konsekwencji niejako oślepia ptaki i nie pozwala im dostrzec stosunkowo słabego światła pochodzącego z gwiazd i słabego, niebieskiego światła (niezbędnego do „odczytania” pola magnetycznego Ziemi), odbijającego się od punktów orientacyjnych.

Nie do końca jasny jest również mechanizm utrzymujący ptaki w świetlnej pułapce [23]. Wiadomo jednak, że efekt ten można w prosty sposób zminimalizować lub całkowicie zredukować poprzez wyłączenie szkodliwego źródła światła. Obserwacje prowadzone w Nowym Jorku potwierdziły, że już po 20–30 minutach od wyłączenia

instalacji świetlnej *Tribute in Light*, upamiętniającej zamachy terrorystyczne z 11 września 2001 roku, ptaki „uwalniały” się z pułapki i odlatywały [24]. Efekt ten jest więc praktycznie natychmiastowy, co pozwala zakładać, że jakiegokolwiek ograniczenie nadmiernego oświetlenia, szczególnie na trasach migracji ptaków, znacząco przyczyni się do ograniczenia ich śmiertelności.

Spośród rozpoznanych negatywnych oddziaływań ALAN na ptaki migrujące, najczęściej wymieniane są efekt przyciągania, dezorientacji oraz efekt bariery. Charakter tych oddziaływań może bezpośrednio wpływać na poziom śmiertelności, jak i przyczynić się do niego pośrednio, poprzez np. zwiększanie nakładów energetycznych w czasie wędrówek w wyniku dezorientacji i zmiany szlaku migracyjnego [25].

Najlepiej rozpoznany i zbadany efektem ALAN jest efekt przyciągania [24]. Przemierzające się w nocy ptaki migrujące wykorzystują ciała niebieskie jako pomoc w nawigacji i utrzymaniu właściwego kierunku lotu. Ptaki napotykające na swojej drodze źródła sztucznego światła: pojedyncze (np. statek na morzu, wieża przekaźnikowa), zgrupowane (np. farma wiatrowa), czy w postaci iluminacji obejmującej rozległe obszary (miasto, obszary zurbanizowane), mogą zmieniać trajektorię lotu dopasowując kierunek lotu do źródła sztucznego światła, które błędnie interpretują jako gwiazdy [26]. Efekt ten jest szczególnie nasilony w czasie zamglenia i dużego zachmurzenia oraz opadów [27, 28, 29, 30, 31], kiedy ciała niebieskie są niewidoczne, a ptaki obniżają pułap lotu ze względu na niekorzystne warunki atmosferyczne. Efekt przyciągania jest zdecydowanie mniej zaznaczony w czasie jasnych nocy około pełni księżyca [32]. Ptaki przyciągane do źródeł ALAN ulegają kolizjom z konstrukcjami, na których zainstalowane są oprawy oświetleniowe, bądź krążą („błądzą”) wokół źródła światła, tracąc w ten sposób energię potrzebną na odbycie wędrówki [33].

Do najbardziej spektakularnych, a przy tym najbardziej dramatycznych przykładów przyciągania ptaków migrujących przez ALAN jest *Tribute in Light* w Nowym Jorku, które ma upamiętniać wydarzenia z 11 września 2001 roku w formie silnych snopów światła generowanych przez reflektory usytuowane w miejscu, gdzie stały budynki World Trade Center. Światło skierowane pionowo w górę w ciągu trwania wydarzenia przyciąga do 160 000 migrujących ptaków [24, 34]. Ptaki „schwyte” w strumień światła traciły orientację i nie mogąc wydostać się poza obszar oddziaływania reflektorów, często utrzymywały się w powietrzu aż do zupełnego wyczerpania i śmierci. Podobne zjawiska obserwowane są bardzo licznie w przypadku ptaków morskich na platformach wiertniczych czy statkach, które znajdują się na trasie przelotu, a także w strefie przybrzeżnej (dotyczy głównie rurkonosych), gdzie zdeorientowane ptaki po zderzeniu z elementami oświetlonej infrastruktury, bądź budynków, nie są w stanie podjąć lotu samodzielnie, przez co padają ofiarą psów, kotów i innych drapieżników [29, 35, 36, 37].

Efekt dezorientacji jest bezpośrednio związany z efektem przyciągania. Jak już wspomniano, przemierzające się ptaki są przyciągane w kierunku źródła światła. Przestrzenna dezorientacja ptaków migrujących to czasowa niezdolność do obierania pożądanego kierunku przemieszczania się. Efekt występuje wówczas, gdy dany

osobnik nie kontynuuje wędrówki w oczekiwanym kierunku, a zamiast tego, rozpoczyna krążenie bądź chaotyczne przemieszczanie się w kierunku od i do źródła światła [28, 36, 38]. Szczególnie narażone na to są ptaki młodociane, które swoją pierwszą wędrówkę na zimowiska odbywają z wieloma niepotrzebnymi przystankami, zbaczając z najkrótszej trasy, czy wręcz wędrując w złym kierunku [26, 39, 40]. Z jednej strony jest to tłumaczone brakiem doświadczenia, z drugiej, związane jest z większą siłą oddziaływania fałszywych wskazówek nawigacyjnych na ptaki młode. Choć ptaki migrujące z zasady są przyciągane do źródeł ALAN w zurbanizowanych regionach, to szczególnie zaznaczony jest ten efekt w czasie migracji jesiennej, kiedy oprócz ptaków dorosłych wędrówkę odbywają po raz pierwszy młodociane osobniki. W czasie migracji wiosennej efekt przyciągania do terenów zurbanizowanych jest nadal widoczny, jednak w mniejszej skali niż ma to miejsce jesienią.

O odwrotnym działaniu do efektu przyciągania przez ALAN, czyli o efekcie bariery, słyszy się rzadko. Jak dotąd dostępne badania ptaków migrujących i zależności pomiędzy ich zachowaniem a ALAN wskazują niemal jednogłośnie, że źródła sztucznego światła w nocy przywabiają ptaki, a nie je odstrasza. Niemniej jednak w czasie badań przy użyciu radarów w Zatoce Meksykańskiej zespołu Cabrera–Cruz zauważono, że ptaki lądują na odpoczynek w większych odległościach od terenów zurbanizowanych (będących źródłem ALAN) wiosną, niż jesienią [19]. Badania te nie dają jednak jednoznacznej odpowiedzi, z czego wynika ta różnica i czy ptaki rzeczywiście unikają ALAN w czasie wiosny. Porównywanie wyników otrzymanych wiosną i jesienią może nie być obiektywne, gdyż sezony nie są porównywalne, w związku z dużą proporcją osobników młodocianych biorących udział w migracji jesiennej (które są podatniejsze na działanie sztucznego światła).

Pomimo dużej liczby artykułów poświęconych tematowi oddziaływania ALAN na ptaki w czasie migracji, szczególnie w ostatnich 20 latach [23], oraz niemal jednogłośnie przekonania o negatywnym oddziaływaniu ALAN na ptaki migrujące, nie można pominąć faktu, że metodyka i zakres badań niemal w każdym przypadku są inne, co utrudnia formułowanie jednoznacznych wniosków.

Większość dotychczasowych badań prowadzona jest głównie w Ameryce Północnej i Europie, a przedmiotem badań są najczęściej ptaki wróblowe, siewkowe lub rurkonose [23]. Badania różnią się również w zakresie zagadnień technicznych ALAN, czyli długości fal, koloru, źródła światła, czy w końcu wartości strumienia świetlnego i jego jednostki.

Niemniej jednak, badania nad śmiertelnością w wyniku kolizji dostarczają ewidentnych dowodów na negatywne oddziaływanie oświetlonych w czasie nocy struktur lądowych, takich jak wieże przekaźnikowe i budynki [9, 41, 42, 43, 44]. Takiego samego oddziaływania należy spodziewać się w przypadku struktur morskich, jak platformy wiertnicze, latarnie morskie oddalone od brzegu, elektrownie wiatrowe oraz oświetlone jednostki pływające, jednak z racji, że zebranie prób w postaci martwych ptaków jest na morzu niemożliwe, doniesienia na temat śmiertelnych kolizji są natury anegdotycznej. Istnieje jednak szereg badań poświęconych głównie ptakom migrującym potwierdzających efekt przyciągania ptaków do ALAN na morzu [35, 37,

45, 46], przy czym nie ma w nich zgodności, co do barwy światła, która przyciąga ptaki najbardziej. Zdecydowana większość badań wskazuje, że efekt przyciągania, a zatem również śmiertelność, zarówno w przypadku struktur lądowych, jak i morskich, są zdecydowanie większe w przypadku światła o barwie niebieskiej i zielonej [47, 48, 49, 50]. Dwie prace wskazują na większe przyciąganie przez światło czerwone i białe, i zalecają źródła światła emitujące promieniowanie o barwie zielonej, jako najbezpieczniejszej dla ptaków [51, 52]. Autorzy tych prac powołują się na badania, w których zaobserwowano powiązanie pomiędzy ekspozycją na ciepłe barwy światła (żółtą i czerwoną) a zaburzeniami magnetorecepcji [53]. Jeśli wzięte zostaną pod uwagę liczne badania dotyczące oddziaływania poszczególnych barw światła na ptaki lęgowe (choć tutaj również istnieje pewna rozbieżność), większość badań wskazuje na negatywny wpływ światła niebieskiego i mniejsze oddziaływania w przypadku barwy białej i czerwonej [54, 55, 56].

### 3. Działania minimalizujące negatywne skutki ALAN

Definicja oświetlenia przyjaznego dla naturalnie ciemnego nieba zmieniła się na przestrzeni lat głównie z uwagi na wzrost świadomości na temat skutków zanieczyszczenia światłem, ale także z uwagi na dynamiczny rozwój technologii wykorzystywanej w branży elektrycznej. Ochrona ptaków przed negatywnymi skutkami oddziaływania efektu latarni morskiej lub kopuły świetlnej wydaje się stosunkowo łatwa do wprowadzenia, bazując na odpowiednim projekcie oświetlenia oraz zarządzaniu oświetleniem wewnętrznym i zewnętrznym.

Wiele z rozwiązań technicznych i zasad użytkowania oświetlenia zdefiniowanych na przestrzeni lat przez naukowców i podmioty zaangażowane w walkę z zanieczyszczeniem światłem nocnego nieba z powodzeniem może służyć równocześnie ochronie ptaków. Należą do nich głównie: ograniczenie liczby punktów oświetleniowych i minimalizowanie oświetlonych powierzchni i znajdujących się na nich obiektów w porze wieczorno-nocnej [57], a także sterowanie oświetleniem znajdujące szerokie zastosowanie w celu podniesienia komfortu użytkownika budynku oraz w celu zminimalizowania zużycia energii [58].

W przypadku oświetlenia wewnętrznego, podstawowe zasady redukujące zanieczyszczenie świetlne w porze wieczorno-nocnej to:

- wyłączenie zbędnego oświetlenia wewnętrznego na przestrzeniach, które nie są aktualnie użytkowane oraz w miejscach, w których nie wymagają tego względy bezpieczeństwa [59, 60] lub przepisy przeciwpożarowe [13];
- wykorzystanie tzw. oświetlenia zadaniowego – celem skrócenia czasu, w którym włączone są wszystkie oprawy oświetleniowe w danym budynku [60];
- wykorzystanie rolet, żaluzji i zasłon w przypadku wykorzystywania oświetlenia wewnątrz budynku – celem ograniczenia strumienia świetlnego wydostającego się na zewnątrz;
- ponadto idealnym zastosowaniem automatyki budynkowej może być jej wykorzystanie do sterowania czasem wyłączenia oświetlenia, zmiany oświetlenia

dziennego na nocne (różniące się wartością strumienia świetlnego lub liczbą punktów oświetleniowych), uruchamianie rolet i zasłon w przypadku oświetlenia wewnętrznych powierzchni [13].

W przypadku oświetlenia zewnętrznego podstawowe zasady to:

- oświetlenie w porze wieczorno-nocnej tylko tej przestrzeni, w której oświetlenie wymagane jest z uwagi na bezpieczeństwo (np. ciągi piesze, parkingi) [13, 60];
- instalowanie opraw oświetleniowych o jak najmniejszej emisji strumienia świetlnego w górną półprzestrzeń [57, 59, 60];
- unikanie zbędnego oświetlenia w postaci podświetlania elewacji (szczególnie od dołu w górę) [57, 59, 60] i zieleni [13];
- dostosowanie natężenia oświetlenia do minimalnych wartości regulowanych normą PN-EN 12464-2 *Technika świetlna. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz* [13] z uwzględnieniem ogólnego współczynnika utrzymania o wartości obliczonej dla wybranego sprzętu oświetleniowego;
- instalowanie w oprawach oświetleniowych (tam, gdzie jest to możliwe) źródeł światła o barwie bursztynowej lub żółtej [57];
- rezygnacja z wszelkiego typu reklam świetlnych bądź ograniczenie ich stosowania do miejsc uczęszczanych licznie przez mieszkańców w godzinach nocnych (np. dworce kolejowe, węzły przesiadkowe);
- instalowanie opraw oświetleniowych (tam, gdzie jest to możliwe) wyposażonych w czujniki ruchu [13, 59].

Pomimo licznych badań i analiz danych literaturowych, naukowcom nadal nie udało się jednoznacznie określić najkorzystniejszej barwy, która zastosowana w projekcie oświetlenia, byłaby optymalną w kontekście negatywnego oddziaływania na ptaki. Rzadko badano wpływ oddziaływania na ptaki fioletowej długości fali, pomimo że barwa ta jest postrzegana przez większość gatunków [62].

Oczekuje się, że źródła LED o niskich temperaturach barwowych, w których komponent światła niebieskiego został zredukowany jak i bursztynowe diody LED (ang. *amber LED*) mają mniejszy wpływ na organizmy żywe, między innymi na ptaki, bezkręgowce i żółwie morskie, w porównaniu do wysokoprężnych lamp sodowych [63]. Część autorów badań wykazuje, że wykorzystywanie bursztynowych diod LED ma negatywny wpływ na sen ptaków występujących na terenach miejskich [64].

Cytowana literatura nie odnosi się do ptaków migrujących jednak wskazuje na szereg zależności i złożoność problemu zanieczyszczenia światłem w odniesieniu do barwy światła najkorzystniejszej dla ptaków. Jako mające negatywny wpływ na dziko występujące gatunki, wskazywane jest światło niebieskie lub błękitne [63] oraz białe [54, 55, 56]. Jednocześnie, wykazano, że w przypadku barwy czerwonej istotnie mniejszy, negatywny wpływ ma emitowanie światła w sposób pulsacyjny, niż ciągły [65]. Badania te przeprowadzono w związku ze stwierdzoną kolizyjnością ptaków z wieżami komunikacyjnymi i potwierdzono, że wprowadzenie migającego światła zmniejszyło śmiertelność ptaków od 50% do 71%.

Część wytycznych, skupiających się na minimalizowaniu zanieczyszczenia światłem, wskazuje jako alternatywne rozwiązanie w ograniczaniu bezpośredniej

emisji światła ku górze nasadzenia drzew, których korony miałyby sprzyjać „blokowaniu” światła w porze wieczorno–nocnej [57, 66]. Należy mieć jednak na uwadze, że zarówno instalowanie opraw oświetleniowych przy drzewach i krzewach, jak i oświetlenie zieleni w celu podkreślenia jej walorów estetycznych, w negatywny sposób wpływa na możliwość wykorzystywania jej w porze wieczorno–nocnej jako siedliska żerowania lub odpoczynku, a także jako miejsca rozrodu, np. gniazd ptaków. Ponadto oświetlenie zieleni może również bezpośrednio wpływać na wzrost niektórych gatunków roślin oraz aktywność organizmów nocą [4, 12, 62, 67, 68].

Jak wykazują badania brytyjskich naukowców, zajmujących się wpływem oświetlenia ulicznego na stan wzrostu zieleni przyulicznej i aktywność charakterystycznych dla nich bezkręgowców, zanieczyszczenie światłem może wpływać na środowisko naturalne w bardzo złożony, trudny do przewidzenia sposób [62]. W powyższych badaniach bursztynowe diody LED powodowały zahamowanie wzrostu części gatunków roślin i miały wpływ na podwyższoną aktywność konkretnych gatunków bezkręgowców. W świetle powyżej zacytowanych badań należy stwierdzić, że oświetlanie zieleni w istotnym sposób zaburza cykl dobowy organizmów i uniemożliwia ich prawidłowe funkcjonowanie. W związku z powyższym wydaje się zasadne całkowite unikanie lokalizacji opraw oświetleniowych, niezależnie od ich funkcji, w bezpośredniej bliskości zieleni, w tym żywopłotów i ogrodów.

Przytaczając rozwiązania minimalizujące zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba, nie sposób pominąć wytycznych i legislacji dotyczących zrównoważonego budownictwa i projektowania budynków przyjaznych ptakom. W USA i Kanadzie, ale również w Wielkiej Brytanii powszechne stało się wdrażanie przez lokalne władze dobrych praktyk lub norm, wskazujących na niezbędny zakres rozwiązań, skupiających się między innymi na minimalizowaniu ryzyka zanieczyszczenia światłem [59, 60, 69]. Dokumenty te w dość precyzyjny sposób wskazują wymagania techniczne dla oświetlenia zewnętrznego, zarówno pod kątem typów opraw oświetleniowych, dopuszczalnej wysokości montażu opraw oświetleniowych, maksymalnego dopuszczalnego kąta nachylenia oprawy oświetleniowej celem oświetlenia danej powierzchni.

Do wytycznych (wzorowanych na Kanadzie, USA czy Wielkiej Brytanii), które warto zaimplementować na polskim gruncie należą:

- ograniczenie maksymalnego dopuszczalnego poziomu temperatury barwowej najbliższej CCT (ang. *Correlated Color Temperature*) do 3000 K, co ogranicza komponent światła niebieskiego;
- zakaz wykorzystywania zewnętrznego oświetlenia dekoracyjnego w godzinach 23.00–5.00 przez cały rok;
- obligatoryjny montaż opraw oświetleniowych kierujących światło wyłącznie w dół w przypadku dopuszczonego oświetlenia dekoracyjnego elewacji lub oświetlenia reklamowego;
- obligatoryjne wyłączanie oświetlenia dekoracyjnego w okresie migracji ptaków (wrzesień–listopad, marzec–maj).

## 4. Podsumowanie i wnioski

Liczne badania poświęcone tematyce oddziaływania ALAN na ptaki migrujące potwierdzają jednoznacznie jego negatywny wpływ na przebieg sezonowych wędrówek we wszystkich badanych grupach taksonomicznych ptaków wędrownych. Powinno to być wystarczająco silną przesłanką i stanowić jednoznaczny impuls do wprowadzania działań minimalizujących negatywne oddziaływania w szerokiej skali przestrzennej. Przykłady dobrych praktyk, płynące głównie z USA i Kanady [70], mogą stanowić inspirację do wprowadzenia podobnych sprawdzonych działań na terenie Polski.

Obecnie prowadzone są prace nad europejskim modelem predykcyjnym GloBAM, który w oparciu o systemy radarowe z dużym prawdopodobieństwem pozwalałyby przewidywać przemieszczanie się ptaków migrujących nad Europą [71], co umożliwiłoby wczesną reakcję i wygaszanie szczególnie opraw oświetleniowych o bardzo intensywnym strumieniu świetlnym w aglomeracjach miejskich. Jak wiadomo, oddziaływania negatywne ALAN dotyczą nie tylko ptaków migrujących, ale praktycznie wszystkich badanych pod tym kątem organizmów. W ostatnich dwudziestu latach liczba artykułów naukowych w tematyce oddziaływań ALAN na organizmy rosła systematycznie – jedynie w odniesieniu do oddziaływań na ptaki obecnie publikowanych jest około 25 artykułów rocznie [23]. Ogromna liczba badań potwierdza, jak ważny jest to temat, jednak nadal pozostaje dużo pytań bez jednoznacznej odpowiedzi.

Niezbędne jest dalsze prowadzenie badań w kierunku znalezienia odpowiedzi, jaka barwa światła ma największe znaczenie dla przyciągania ptaków migrujących do źródła ALAN. Badania powinny dokładnie opisywać zagadnienia techniczne, aby prace mogły zostać powielane w innym miejscu i w odniesieniu do innych grup ptaków. Sposób prowadzenia obserwacji reakcji przelatujących ptaków w nocy nastrocza oczywistych trudności, dlatego również ten aspekt w cytowanych badaniach bardzo się różnił. Stosowana w niektórych projektach analiza akustyczna pozwala na identyfikację gatunków przyciąganych przez ALAN, ale tylko tych, które są aktywne głosowo w czasie przelotu [15, 16]. Łapanie ptaków w sieci w pobliżu źródła światła pozwala na poznanie struktury gatunkowej jedynie tych ptaków, które najbardziej reagują na światło i przyciągane są do samego źródła, jednak nie daje informacji na temat ptaków przywabionych, ale pozostających w locie. Obserwacje z platform wiertniczych i statków dotyczą bardzo małej powierzchni i również nie dają informacji na temat ptaków znajdujących się w zasięgu oddziaływania światła, ale niewidocznych z poziomu platformy czy też jednostki pływającej.

Najdokładniejszą metodą wydaje się badanie przelatujących ptaków przy użyciu radaru poziomego, który pozwala na śledzenie trajektorii lotu z dużą dokładnością, a zatem umożliwia obserwację reakcji poszczególnych osobników na światło o wybranej do badań długości fal i częstotliwości. Badania przy użyciu radaru pionowego informowałyby o intensywności migracji na wysokościach nawet do 1500 metrów nad poziomem morza [72], co umożliwiłoby wiarygodne estymacje liczebności ptaków

narażonych na oddziaływanie ALAN. Na obecny moment nie jest możliwe dokładne oznaczenie gatunków przy użyciu radarów (możliwa jest tylko estymacja wielkości ptaka), więc te informacje musiałyby być uzyskane w inny sposób, na przykład przez analizę akustyczną, jednak jak już wspomniano, ta metoda również ma swoje ograniczenia.

Mimo braku jednoznacznych odpowiedzi nasuwa się oczywisty wniosek, że najlepszym rozwiązaniem dla środowiska (nie tylko ptaków migrujących) jest ograniczanie sztucznego oświetlenia w czasie nocy. Istnieje szereg rozwiązań technicznych, które w prosty sposób pozwalają na zmniejszenie emisji światła. Coraz więcej krajów wprowadza odpowiednie zapisy na różnych poziomach regulacyjnych, które mają na celu zmniejszenie zanieczyszczenia świetlnego [73, 74]. Głównym celem tych zapisów jest ochrona zdrowia człowieka przed szkodliwym działaniem ALAN, jednak coraz częściej pojawiają się również prawa chroniące przyrodę. W niektórych krajach, takich jak Francja, Szwajcaria, Liechtenstein wprowadzono również regulacje dotyczące granicznej wartości temperatury barwowej najbliższej źródeł światła instalowanych w oprawach oświetleniowych dla infrastruktury publicznej, decydując się na wybór lamp o cieplej barwie (poniżej 3000 K), które według przeważającej liczby badań generują najmniej negatywnych oddziaływań na środowisko przyrodnicze [75].

## Literatura

- [1] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K. et al., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, 2016, 2, e1600377. DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- [2] Senzaki M., Barber J.R., Phillips J.N. et al., *Sensory pollutants alter bird phenology and fitness across a continent*, Nature, 2020, 587, s. 605–609, DOI: 10.1038/s41586-020-2903-7.
- [3] Moaraf S., Vistoropsky Y., Pozner T., Heiblum R., Okuliarová M., Zeman M., Barnea A., *Artificial light at night affects brain plasticity and melatonin in birds*, Neuroscience Letters, 2020, 716, art. 134639, DOI: 10.1016/j.neulet.2019.134639.
- [4] Rahman M.S., Kim B.H., Takemura A., Park C.B., Lee Y.D., *Influence of light–dark and lunar cycles on the ocular melatonin rhythms in the seagrass rabbitfish, a lunar–synchronized spawner*, Journal of Pineal Research, 2004, 37, 2, s. 122–128, DOI: 10.1111/j.1600-079X.2004.00147.x.
- [5] Brüning A., Hölker, Franke S., Kleiner W., Kloas W., *Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch*, Science of the Total Environment, 2016, 543, s. 214–222.
- [6] Owens A.C.S., Lewis S.M., *The impact of artificial light at night on nocturnal insects: a review and synthesis*, Ecology and Evolution, 2018, 8, s. 11337–11358.
- [7] Canário F., Hespagnol Leitão A., Tomé R., *Predation Attempts by short-eared and long-eared owls on migrating songbirds attracted to artificial lights*, Journal of Raptor Research, 2012, 46, s. 232–234, DOI: 10.3356/JRR-11-15.1.



- [8] Hoffmann J., Hölker F. and Eccard J.A., *Welcome to the Dark Side: Partial Nighttime Illumination Affects Night – and Daytime Foraging Behavior of a Small Mammal.*, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 9, art. 779825.
- [9] Lao S., Robertson B.A., Anderson A., Blair R.B., Eckles J.W., Turner R.J., Loss S.R., *The influence of artificial light at night and polarized light on bird–building collisions*, *Biological Conservation*, 2020, 241, s. 108358, DOI: 10.17632/vcm4pbcvpg.1.
- [10] Allen J.A., *Destruction of birds by light–houses*, *Bulletin of the Nuttall Ornithological Club* 5, 1880, 3, s. 131–38.
- [11] Merriam C.H. *Preliminary report of the committee on bird migration*, *Auk*, 1885, 2, s. 53–65, DOI: 10.2307/4625173.
- [12] Munro A., *A preliminary report on the destruction of birds at lighthouses on the coast of British Columbia*, *Canadian Field–Naturist*, 1924, 38, s. 141–145.
- [13] Szurlej-Kiełańska A., Pilacka L., Górecki D., *Ochrona ptaków przed kolizjami ze szklanymi budynkami. Praktyczne i skuteczne rozwiązania*, Stowarzyszenie Wspierania Inwestycji Przyjaznych PTA.com, 2020.
- [14] Loss S.R., Will T., Loss S.S., Marra P.P., *Bird–building collisions in the United States: Estimates of annual mortality and species vulnerability*, *The Condor*, 2014, 116, s. 8–23, DOI: 10.1650/CONDOR-13-090.1.
- [15] Winger B.M., Weeks B.C., Farnsworth A., Jones A.W., Hennen M., Willard D.E., *Nocturnal flight–calling behaviour predicts vulnerability to artificial light in migratory birds*, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019, 286, art. 20190364, DOI: 10.1098/rspb.2019.0364.
- [16] Pamuła H., Kłaczyński M., Wszolek W., Remisiewicz M., *Monitoring akustyczny ptaków migrujących nocą – zagadnienia związane z automatyczną detekcją głosów*, *Ornis Polonica*, 2017, 58, s. 187–196.
- [17] Kyba, C.C.M. et al., *Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent*, *Science Advances*, 2017, 3, s. 1–9, DOI: 10.1126/sciadv.1701528.
- [18] Zhou Y. et al, *A global map of urban extent from nightlights*, *Environmental Research Letters*, 2015, 10, art. 054011, DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054011.
- [19] Cabrera–Cruz S.A., Smolinsky J.A., Buler J.J., *Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally–migrating birds around the world*, *Scientific Reports*, 2018, 8, art. 3261, DOI: 10.1038/s41598–018–21577–6.
- [20] Przybylski M., Zięćik P., Lewczuk M., *Sprawozdanie z realizacji zadania p. Badanie wędrówek ptaków w pasie nadmorskim Gdańska*, Pomorskie Towarzystwo Hydrologiczno-Przyrodnicze, 2019.
- [21] Zhao X., Chen M., Wu Z., Wang Z., *Factors influencing phototaxis in nocturnal migrating birds*, *Zoological Science*, 2014, 31, 12, s. 781–788, DOI: 10.2108/zs130237.
- [22] Chernetsov N.S., *Orientation and navigation of migrating birds*, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2016, 43, s. 788–803, DOI: 10.1134/S1062359016080069.
- [23] Adams C.A., Fernández-Juricic E., Bayne E.M. et al, *Effects of artificial light on bird movement and distribution: a systematic map*, *Environmental Evidence*, 2021, 10, 1, s. 1–28, DOI: 10.1186/s13750–021–00246–8.
- [24] Van Doren B.M., Horton K.G., Dokter A.M., Klinck H., Elbin S.B., Farnsworth A., *High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114, 42, s. 11175–11180, DOI: 10.1073/pnas.1708574114.
- [25] Bruderer B., *Vogelzug. Eine schweizerische Perspektive*, *Der Ornithologische Beobachter*, Beiheft 12, 2017.

- [26] Atchoi E., Mitkus M., Rodríguez A., *Is seabird light-induced mortality explained by the visual system development?*, Conservation Science and Practice, 2020, 2, 6, s. 2–5, DOI: 10.1111/csp2.195.
- [27] Thompson D., *Effects of ships lights on fish, squid and seabirds*, Wellington, 2013.
- [28] Alerstam T., *Ecological Causes and Consequences of Bird Orientation [w:] Orientation in Birds*, P. Berthold (ed.), Experientia Supplementum, vol 60. Birkhäuser Basel, 1991, s. 202–225 DOI: 10.1007/978-3-0348-7208-9\_10.
- [29] Ronconi R.A., Allard K.A., Taylor P.D., *Bird interactions with offshore oil and gas platforms: Review of impacts and monitoring techniques*, Journal of Environmental Management, 2015, 147, s. 34–45, DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.031.
- [30] Pettersson J., *Night migration of songbirds and waterfowl at the Utgrunden off-shore wind farm: a radar-assisted study in southern Kalmar Sound*, Report No. 6438, Vindval, Swedish Environmental Protection Agency (EPA), 2011.
- [31] La Sorte F.A. et al., *The role of atmospheric conditions in the seasonal dynamics of North American migration flyways*, Journal of Biogeography, 2014, 41, 9, s. 1685–1696, DOI: 10.1111/jbi.12328.
- [32] Montevecchi W.A., *Influences of artificial light on marine birds*, [w:] *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press, 2006, s. 94–113.
- [33] Isaksson C., *Impact of urbanization on birds [w:] Bird species. How they arise, modify and vanish*, D.T. Tietze (ed.), Springer open, Cham, Switzerland, 2018, s. 235–257.
- [34] Greenspan J., *Making the 9/11 Memorial Lights Bird-Safe*, September 11, 2015, Audubon Society, <https://www.audubon.org/news/making-911-memorial-lights-bird-safe> [dostęp: 22.06.2020].
- [35] Rodríguez A., Burgan G., Dann P., Jessop R., Negro J.J., Chiaradia A., *Fatal attraction of short-tailed shearwaters to artificial lights*, PLoS One, 2014, 9, 10, e110114, DOI: 10.1371/journal.pone.0110114
- [36] Rodríguez A. et al., *Seabird mortality induced by land-based artificial lights*, Conservation Biology, 2017, 31, 5, s. 986–1001, DOI: 10.1111/cobi.12900.
- [37] Rodríguez A. et al., *Light pollution and seabird fledglings: Targeting efforts in rescue programs*, Journal of Wildlife Management, 2017, 81, 4, s. 734–741, DOI: 10.1002/jwmg.21237.
- [38] Herbert A.D., *Spatial Disorientation in Birds*, Wilson Bulletin, 1970, 82, 4, s. 400–419.
- [39] La Sorte F.A., Fink D., Buler J.J., Farnsworth A., Cabrera-Cruz S.A., *Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations*, Global Change Biology, 2017, 23, 11, s. 4609–4619, DOI: 10.1111/gcb.13792.
- [40] Horton K.G, Nilsson C., Van Doren B.M., La Sorte F.A., Dokter A.M., Farnsworth A., *Bright lights in the big cities: migratory birds' exposure to artificial light*, Frontiers in Ecology and the Environment, 2019, 17, 4, s. 209–214, DOI: 10.1002/fee.2029.
- [41] Elmore J.A. et al., *Correlates of bird collisions with buildings across three North American countries*, Conservation Biology, 2021, vol. 35, no. 2, ss. 654–665, DOI: 10.1111/cobi.13569.
- [42] Longcore T. et al., *An estimate of avian mortality at communication towers in the United States and Canada.*, PLoS One, 2012, 7, 4, DOI: 10.1371/journal.pone.0034025.
- [43] Longcore T. et al., *Avian mortality at communication towers in the United States and Canada: Which species, how many, and where?*, Biological Conservation, 2013, 158, s. 410–419, DOI: 10.1016/j.biocon.2012.09.019.

- [44] Loss S.R., Lao S., Eckles J.W., Anderson A.W., Blair R.B., Turner R.J., *Factors influencing bird-building collisions in the downtown area of a major North American city*, PLoS One 2019, 14, 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0224164.
- [45] Gauthreux S.A., Belser C.G., *Effects of artificial night lighting on migrating birds*, Washington, Island Press, 2006.
- [46] Rodríguez A., Dann P., Chiaradia A., *Reducing light-induced mortality of seabirds: High pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters*, Journal for Nature Conservation, 2017, 39, s. 68–72, DOI: 10.1016/j.jnc.2017.07.001.
- [47] Rebke M., Dierschke V., Weiner C.N., Aumüller R., Hill K., Hill R., *Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions*, Biological Conservation, 2019, 233, s. 220–227, DOI: 10.1016/j.biocon.2019.02.029.
- [48] Evans W.R., Akashi Y., Altman N.S., Manville A.M., *Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light*, North American birds, 2007, 60, 4, s. 476–488.
- [49] Zhao X., Zhang M., Che X., Zou F., *Blue light attracts nocturnally migrating birds*, Condor, 2020, 122, 2, DOI: 10.1093/condor/duaa002.
- [50] Wang Z., Lin A., Yuan Q., Zhou W., Zhang W., Yang X.J., *Attraction of night-migrating birds to light-blue structures causes mass bird deaths*, Environmental Science & Technology, 2011, 45, 24, s. 10296–10297.
- [51] Poot H., Ens B.J., de Vries H., Donners M.A.H., Wernand M.R., Marquenie J.M., *Green light for nocturnally migrating birds*, Ecology and Society, 2008, 13, 2, art. 47.
- [52] Marquenie J., Donners M., Poot H., Steckel W., De Wit B., *Adapting the spectral composition of artificial lighting to safeguard the environment [w:] 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications*, Weimar, Germany, 2008, DOI: 10.1109/pciceurope.2008.4563525
- [53] Wiltschko W., Wiltschko R., *The effect of yellow and blue light on magnetic compass orientation in European robins, Erithacus rubecula*, Journal of Comparative Physiology A, 1999, 184, 3, s. 295–299.
- [54] Bani Assadi S., Fraser K.C., *The Influence of Different Light Wavelengths of Anthropogenic Light at Night on Nestling Development and the Timing of Post-fledge Movements in a Migratory Songbird*, Frontiers in Ecology and Evolution, 2021, 9, DOI: 10.3389/fevo.2021.735112.
- [55] Miller M.W., *Apparent effects of light pollution on singing behavior of American Robins*, Condor, 2006, 108, 1, s. 130–139.
- [56] Salamolard M., Ghestemme T., Couzi F.-X., Minatchy N., Le Corre M., *Impacts des éclairages urbains sur les pétrels de Barau, Pterodroma barau sur l'île de la Réunion et mesures pour réduire ces impacts*, Ostrich 2007, 78, 2, s. 449–452.
- [57] *Zanieczyszczenie światłem*. Polskie Towarzystwo Astronomiczne Stowarzyszenie Polaris – OPP, 2018, <https://www.pta.edu.pl/pliki/zanieczyszczenie-swiatlem.pdf> (dostęp: 17.01.2022).
- [58] Kalinowski M., Zarębski T., *Sterowanie oświetleniem w inteligentnych budynkach [w:] Materiały pokonferencyjne: VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL*, 2012.
- [59] *Best Practices Effective Lighting, City of Toronto*, 2017, <https://www.toronto.ca/wp-content/uploads/2018/03/8ff6-city-planning-bird-effective-lighting.pdf> (dostęp: 10.01.2022).

- [60] Sheppard Ch., Phillips G., *Bird-Friendly Building Design*, 2nd Ed., The Plains, American Bird Conservancy, 2015, [https://abcbirds.org/wp-content/uploads/2019/04/Bird-Friendly-Building-Design\\_Updated-April-2019.pdf](https://abcbirds.org/wp-content/uploads/2019/04/Bird-Friendly-Building-Design_Updated-April-2019.pdf), (dostęp: 20.11.2021).
- [61] Tabaka P., Fryc I. *Wpływ właściwości odbicia podłoża, na którym zainstalowano daną oprawę oświetleniową na względną wartość zanieczyszczenia jej otoczenia światłem*, Polish Journal for Sustainable Development, 2017, 21(2), DOI: 10.15584/pjsd.2017.21.1.15.
- [62] Bennie J. et al., *Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem*, Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2015, DOI: 10.1098/rstb.2014.0131.
- [63] Longcore T., et al., *Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night*, Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2018, 329(8-9), s. 511–521, DOI: 10.1002/jez.2184.
- [64] Aulsebrook A. et al., *White and Amber Light at Night Disrupt Sleep Physiology in Birds*, Current Biology, 2020, 30, s. 3657–3663.
- [65] Gehring J., Kerlinger P., Manville A.M., *Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions*, Ecological Applications, 2009, 19(2), s. 505–514, DOI:10.1890/07-1708.1.
- [66] Aubé M., *Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*, Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences, 2016, 370, DOI: 10.1098/rstb.2015.0143.
- [67] Grubisic M. et al., *Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates*, Sustainability, 2019, 11, 22, art. e6400, DOI: 10.3390/su11226400.
- [68] Ikeno T. et al., *Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters*, General and Comparative Endocrinology, 2014, 197, s. 56–64.
- [69] *Green standards for light pollution & bird-friendly development. By-law recommendations for the City of London*, Ecological and Environmental Advisory Committee, Advisory Committee on the Environment, Animal Welfare Advisory Committee, 4<sup>th</sup> draft 2018, <https://pub-london.escribemeetings.com/filestream.ashx?DocumentId=46167> (dostęp: 17.01.2022).
- [70] *BirdCast, "Lights Out"*, 2018, <https://birdcast.info/science-to-action/lights-out/> (dostęp: 17.01.2021).
- [71] GloBAM, 2021, <https://globam.science/> (dostęp: 17.01.2022).
- [72] Schönberger L., *Ocena oddziaływania MFW BC-Wind na ptaki migrujące w odniesieniu do efektu bariery i ryzyka kolizji na podstawie obliczeń modelowych Załącznik 4. Raport o oddziaływaniu morskiej farmy wiatrowej BC-Wind na środowisko*, MEWO S.A. 2021, [http://portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/MFW\\_BC-WIND/DO%20UDZIA%C5%81U%20SPO%C5%81ECZNEGO/ZAL\\_4/BCW\\_REP\\_ROOS\\_PL\\_A\\_ZAL\\_04.pdf](http://portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/MFW_BC-WIND/DO%20UDZIA%C5%81U%20SPO%C5%81ECZNEGO/ZAL_4/BCW_REP_ROOS_PL_A_ZAL_04.pdf) (dostęp: 17.01.2022).
- [73] Schönberger L., *A New Challenge for Spatial Planning: Light Pollution in Switzerland*, ETH Zürich, 2020.
- [74] Schönberger L., *Light pollution in Canton Aargau. Integration of measures against light pollution into local spatial planning instruments.*, ETH Zürich, 2021.
- [75] BAFU, *Vollzugshilfe Lichtemissionen*, Bern, 2021.

## LIT NIGHT, A CLEAR THREAT TO NATURE – ALAN’S IMPACT ON MIGRATORY BIRDS

**Abstract:** The negative impact of excessive artificial light at night (ALAN) affects birds migrating nocturnally, and is one of the major causes of direct mortality of birds due to human activities. Among the recognized negative impacts of ALAN on migratory birds are: attraction, disorientation, and barrier effects. The nature of these impacts can directly affect mortality rates as well as contribute to them indirectly by increasing energy expenditure during migration as a result of disorientation and migration route changes. The majority of studies indicate that the effect of attraction, and therefore mortality, for both land and offshore structures is significantly greater with blue and green light, however, there are papers indicating greater bird attraction to red and white light. Because of these discrepancies, further research is needed to answer what color of the light (wavelength) is most important in attracting migratory birds to the ALAN source. At present, we recommend the use of warm-colored lights with a maximum temperature of 3,000 K.

**Keywords:** ALAN, nocturnal migration, bird collisions, avian mortality, light pollution

# WPŁYW UŻYTEGO LUKSOMIERZA NA WYNIKI POMIARÓW NATĘŻENIA OŚWIETLENIA W KONTEKŚCIE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM

**Przemysław Tabaka**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka  
*przemyslaw.tabaka@p.lodz.pl*

**Justyna Wtorkiewicz**

Pracownia Fizykochemii, Okręgowy Urząd Miar w Łodzi  
*oum.lodz.w42@poczta.gum.gov.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów natężenia oświetlenia dla siedmiu typów luksomierzy z użyciem sześciu źródeł światła o różnych wartościach temperatury barwowej najbliższej. Pomiary przeprowadzono w punktach charakterystycznych przy ocenie immisji światła: 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że w przypadku stałych warunków oświetlenia, dokładność pomiaru zależy od odpowiedniego doboru przyrządu pomiarowego, w szczególności jego rozdzielczości. Nie bez znaczenia pozostaje także charakterystyka widmowa promieniowania emitowanego przez różne źródła światła.

**Słowa kluczowe:** luksomierz, wzorcowanie, rozdzielczość, błąd pomiaru, źródła światła

## 1. Wstęp

Trudno jest sobie wyobrazić funkcjonowanie współczesnego świata bez oświetlenia zewnętrznego. Oświetlenie publiczne wpływa na komfort i poczucie bezpieczeństwa mieszkańców. Na ten aspekt uwagę zwrócili autorzy wielu prac [1, 2, 3] jednoznacznie wskazując, że nocne oświetlenie zwiększa społeczne poczucie bezpieczeństwa. Dobrym przykładem ilustrującym wpływ braku oświetlenia na samopoczucie i komfort mieszkańców był sprzeciw łodzian wobec decyzji urzędników w 2011 roku, dotyczącej skrócenia czasu pracy oświetlenia ulicznego w Łodzi o 45 minut w ciągu doby [4]. Załączanie latarni ulicznych 15 minut po zachodzie słońca

i wyłączenie 30 minut przed wschodem spowodowało, że osoby udające się do pracy lub z niej wracające, poruszały się po nieoświetlonych ulicach. Decyzja dotycząca ograniczenia czasu pracy oświetlenia była podyktowana oszczędnościami. W wyniku licznych skarg mieszkańców, urzędnicy mając na uwadze komfort i bezpieczeństwo łodzian, wycofali się z tego pomysłu, powracając tym samym do poprzedniego czasu pracy latarni.

Z użytkowaniem oświetlenia zewnętrznego wiąże się jednak emisja strumienia świetlnego w kierunku obszarów i obiektów, które nie są celem oświetlenia. Światło docierające do ścian budynków, okien, a także w górną półprzestrzeń (w kierunku nieboskłonu) jest źródłem zanieczyszczenia światłem. Przykłady immisji światła (wnikania światła do wnętrza budynków) zilustrowano na rysunku 1. Na pierwszych dwóch fotografiach (rys. 1a i 1b), źródłem niepożądanego światła, emitowanego w kierunku okien, są zainstalowane w pobliżu budynków oprawy oświetleniowe typu kula mleczna. Niestety tego typu rozwiązania nie należą do rzadkości, na co zwrócono uwagę w literaturze [5, 6, 7, 8].



**Rys. 1.** Nocny krajobraz miast, przykłady immisji światła przez uliczne oprawy oświetleniowe w kierunku budynków mieszkalnych: a) Łódź, b) Kalisz, c), d) Konstancin Łódzki

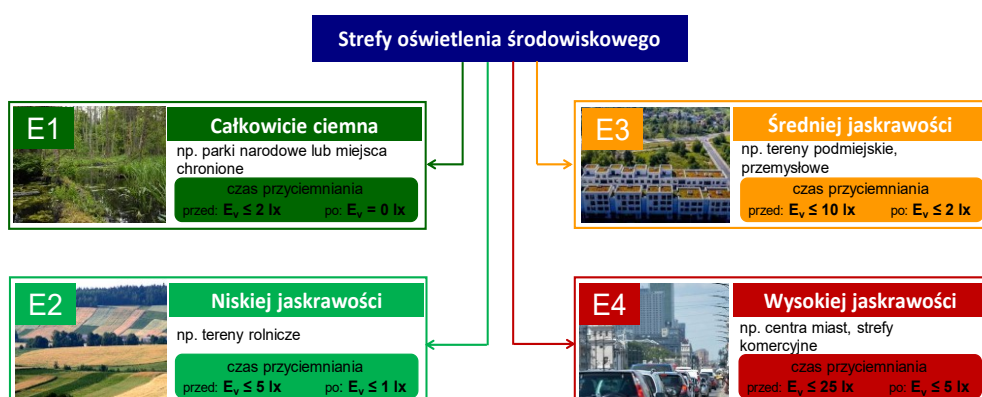
*Źródło: opracowanie własne.*

Prawdopodobnie aspekt bezpieczeństwa zadecydował, że na szczycie budynku na jednym z osiedli mieszkaniowych, zainstalowano uliczną oprawę oświetleniową (rys. 1c). Konsekwencją tego stanu rzeczy jest oświetlenie nie tylko chodników oraz

placu zabaw, ale także elewacji budynku mieszkalnego zawierającego okna. Na powierzchni budynku mieszkalnego (rys. 1d) można dostrzec wyraźną granicę światła i cienia, której źródłem jest zainstalowana na sąsiednim budynku oprawa oświetleniowa (rys. 1c).

Wobec faktu, że zanieczyszczenie światłem jest przyczyną licznych problemów mających wpływ na samopoczucie użytkowników budynków oraz na funkcjonowanie środowiska, opracowane zostały wymagania dotyczące ograniczania światła przeszkadzającego. Zarówno w normach dotyczących oświetlenia zewnętrznego (PN-EN 12464-2:2008 [9], PN-EN 12464-2:2014-05 [10]), jak i w raporcie technicznym Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE 150:2017 [11]) podano wartości graniczne światła przeszkadzającego, którego źródłem są instalacje oświetlenia zewnętrznego. Jednym z parametrów podlegającym weryfikacji przy ocenie ograniczenia światła przeszkadzającego jest natężenie oświetlenia  $E_v$ . Zmierzone na pionowej powierzchni okna natężenie oświetlenia  $E_v$ , nie powinno przekraczać wartości granicznych podanych w normach [9, 10] oraz w raporcie CIE [11].

Graniczne wartości natężenia oświetlenia uzależnione są od strefy oświetlenia środowiskowego (które oznaczono symbolami: E1, E2, E3 oraz E4), a także pory dnia. Wartości, które dopuszczalne są we wczesnych godzinach wieczornych, niekoniecznie są akceptowalne w późniejszych godzinach, dlatego też wprowadzono rozróżnienie na przed i po czasie przyciemniania (rys. 2). Najjaśniejszym obszarem jest strefa E4, do której zalicza się np. centra miast i strefy komercyjne, natomiast najciemniejszym strefa E1. Dla porządku należy wspomnieć, że w drugiej edycji raportu technicznego CIE 150, wydanym w 2017 r., wyodrębniono strefę samoistnie ciemną, którą oznaczono symbolem E0. Do strefy tej zalicza się np. parki UNESCO, parki ciemnego nieba, główne obszary obserwacji astronomicznych. Z uwagi na fakt, że w strefie tej pionowe natężenia oświetlenia (zarówno przed, jak i po czasie przyciemniania) ma być równe zero, nie uwzględniono jej na rysunku 2.



**Rys. 2.** Graniczne wartości pionowego natężenia oświetlenia dla poszczególnych stref środowiskowych

*Źródło: opracowanie własne.*



Wytyczne dotyczące ograniczenia światła przeszkadzającego ujęto także w Obwieszczeniu Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 7 czerwca 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [12]. W punkcie 6, w paragrafie 293 wspomnianego rozporządzenia [12] zapisano: „Urządzenia oświetleniowe, w tym reklamy, umieszczone na zewnątrz budynku lub w jego otoczeniu nie mogą powodować uciążliwości dla jego użytkowników ani też przechodniów i kierowców. Jeżeli światło skierowane jest na elewację budynku zawierającą okna, natężenie oświetlenia na tej elewacji nie może przekraczać 5 luksów w przypadku światła białego i 3 luksów w przypadku światła kolorowego lub światła o zmieniającym się natężeniu, błyskowego, ewentualnie pulsującego”.

Wymóg ten z założenia ma ograniczyć wnikanie przez otwory okienne do wnętrza mieszkań światła, którego źródłem są instalacje oświetlenia zewnętrznego. Zbyt duże rozjaśnienie w porze nocnej pomieszczeń mieszkalnych (np. sypialni) może być źródłem dyskomfortu, złego samopoczucia. Jak wynika z literatury [13], ekspozycja w porze nocnej na światło niekorzystnie wpływa na organizm człowieka. A zatem poza podstawową funkcją oświetlenia zewnętrznego, jaką jest m.in. stworzenie poczucia bezpieczeństwa pieszych, istotne są także aspekty środowiskowe tj. immisja światła.

W celu dokonania oceny spełnienia wymagań normatywnych można przeprowadzić obliczenia numeryczne, wykorzystując do tego celu specjalistyczne oprogramowanie komputerowe lub wykonać pomiary terenowe [14]. Niestety zarówno w wymaganiach normatywnych [9, 10], jak i w rozporządzeniu [12] brakuje precyzyjnych informacji na temat metodyki pomiarów pionowego natężenia oświetlenia. W projekcie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 11 maja 2016 r., zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [15], w objaśnieniu wielkości  $E_v$  (pod tabelą, w której podano maksymalne poziomy światła przeszkadzającego dla poszczególnych stref środowiskowych) podano, że pionowe natężenie oświetlenia mierzone jest w centralnym punkcie płaszczyzny okna pomieszczenia stałego pobytu. W wyjaśnieniu tym nie doprecyzowano jednak, po której stronie okna (zewnątrznej czy wewnętrznej) należy umieścić głowicę fotometryczną luksomierza, co ma istotny wpływ na wynik pomiaru [14]. Warto jednak zaznaczyć, że zaproponowane zmiany w projekcie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa nie weszły w życie. Wobec faktu, że w aktualnie obowiązującym rozporządzeniu, w którym poruszono kwestię uciążliwego wpływu światła pochodzącego od zewnętrznych instalacji oświetleniowych, mowa jest o natężeniu oświetlenia na elewacji, należy domniemywać, że pomiary należy przeprowadzać po zewnętrznej stronie okna (rys. 3).



**Rys. 3.** Pomiar pionowego natężenia oświetlenia na powierzchni okna w budynku mieszkalnym

*Źródło: opracowanie własne.*

Do pomiarów natężenia oświetlenia używa się luksomierza. Jest to fotometr, który zwykle składa się z miernika prądu fotoelektrycznego (mikroamperomierza) oraz głowicy fotometrycznej. Wytwarzany przez fotodiodę (znajdącą się w głowicy fotometrycznej) prąd fotoelektryczny jest proporcjonalny do padającego na jej powierzchnię światłoczułą strumienia świetlnego. Mierzona wartość wskazywana na wyświetlaczu luksomierza wyskalowana jest w luksach (w jednostce wielkości mierzonej). Dokładność przeprowadzonego pomiaru zależy od wielu czynników. Jednym z istotnych elementów mającym wpływ na wynik pomiaru natężenia oświetlenia jest jakość metrologiczna użytego przyrządu. Zagadnienie to jest szczególnie ważne przy pomiarach niskich wartości natężenia oświetlenia (tj. 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx i 25 lx), które występują przy ilościowej ocenie zanieczyszczania światłem. Zaleca się, aby luksomierze były poddawane okresowemu wzorcowaniu. Jest to jeden z najprostszych sposobów umożliwiających weryfikację prawidłowości wskazań. Warto też podkreślić, że wzorcowanie jest podstawą utrzymania spójności pomiarowej.

W artykule zamieszczono przykładowe wyniki wzorcowania różnych typów luksomierzy. Zaprezentowano także wyniki pomiarów laboratoryjnych niskich wartości natężenia oświetlenia przy zastosowaniu luksomierzy o różnych rozdzielczościach (0,001 lx, 0,01 lx, 0,1 lx, 1 lx). Jednym z ważniejszych wymagań stawianych luksomierzom jest dostosowanie krzywej czułości widmowej głowicy fotometrycznej do czułości widmowej normalnego obserwatora fotometrycznego CIE. W praktyce czułość widmowa głowic fotometrycznych odbiega od charakterystyki widmowej zalecanej przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową. Fakt ten będzie źródłem różnic w zarejestrowanych wartościach natężenia oświetlenia.

W celu określenia stopnia rozbieżności w wynikach pomiarów natężenia oświetlenia, przeprowadzonych różnymi luksomierzami, uwzględniono w badaniach

charakterystyki spektralne promieniowania emitowanego przez typowe źródła światła stosowane w zewnętrznych oprawach oświetleniowych (lampy sodowe oraz źródła LED).

Problematyka wpływu charakterystyki spektralnej promieniowania na wyniki wskazań nie jest zagadnieniem nowym. Na problem ten zwrócono uwagę we wcześniejszych pracach eksperymentalnych [16, 17], jednak opublikowane wyniki pomiarów odnoszą się do większych wartości natężenia oświetlenia (znacznie przekraczających 25 lx), niż te, o których jest mowa przy ocenie zanieczyszczenia światłem.

## 2. Przedmiot, zakres i sposób przeprowadzenia badań

### 2.1. Przedmiot badań

Pomiarom laboratoryjnym poddano siedem luksomierzy. Jednym z kryteriów wyboru była rozdzielczość na pierwszym zakresie pomiarowym. Na potrzeby niniejszej pracy poszczególnym luksomierzom nadano numerację od 1 do 7. Fotometry uszeregowano od „najlepszego” do „najgorszego” przyjmując jako kryterium rozdzielczość oraz całkowity błąd. Luksomierze, które uwzględniono w eksperymencie charakteryzują się różnymi parametrami technicznymi.

Pierwszy fotometr (o numerze 1), jest reprezentantem popularnego w Polsce luksomierza o rozdzielczości 0,001 lx. Mając na uwadze, że najliczniejsze wśród użytkowników luksomierzy są takie, których rozdzielczość na pierwszym podzakresie wynosi 0,01 lx, do badań wybrano 3 różne typy o takim parametrze. Do badań wybrano także jeden luksomierz o rozdzielczości 0,1 lx i dwa luksomierze różnych typów o rozdzielczości 1 lx.

Wybrane do badań przyrządy są próbką z dostępnych na rynku luksomierzy. Reprezentują różny poziom pod względem jakości wykonania, dokładności pomiaru, wieku przyrządu, miejsca produkcji oraz ceny rynkowej. Wartość rynkowa najdroższego luksomierza jest około 20 razy większa od luksomierza najtańszego. Poszczególne egzemplarze pochodzą od różnych użytkowników i były eksploatowane w różnych warunkach i z różną intensywnością. Każdy z zaprezentowanych luksomierzy może być przeznaczony do typowych pomiarów natężenia oświetlenia w miejscach pracy. Podstawowe dane techniczne luksomierzy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe informacje techniczne dotyczące luksomierzy, które poddano pomiarom

Nr	Błąd całkowity (dokładność)	Błąd $f_1^*$	Klasa luksomierza	Rozdzielczość na pierwszym zakresie	Zakresy pomiarowe, lx	Możliwość adiustacji
1	$\leq 2,5\%$	$\leq 2,0\%$	A	0,001	30 300 300000	TAK
2	$\pm(5\% \text{ odczytu} + 10 \text{ cyfr})$	$\leq 6\%$	x	0,01	40 400 4000 40000	BRAK
3	$\pm(3\% \text{ rdg} + 10 \text{ digits})$	x	x	0,01	20 200 200 20000	BRAK
4	$\leq 3\%$	$\leq 2,0\%$	A	0,01	40 400 4000 400000	BRAK
5	$\leq 3,5\%$	$\leq 3\%$	B	0,1	200 2000 20000	TAK
6	$\pm(3\% \text{ rdg} + 2 \text{ dgt})$	x	x	1	200 20000	TAK
7	$\pm(4\% \text{ rdg} + 0,5\% \text{ f.s})$	x	x	1	200 20000	BRAK
* – błąd niedopasowania widmowego x – brak informacji w specyfikacji luksomierza						

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych producentów luksomierzy.

Zdjęcia badanych fotometrów zamieszczono na rysunku 4. W celu uniknięcia posądzenia o uprawianie reklamy czy też antyreklamy odstąpiono od podawania producentów oraz typów luksomierzy, a symbole naniesione na jednostkach fotometrów przykryto czarnym prostokątem.

W specyfikacjach technicznych luksomierzy producenci podają informację na temat całkowitego błędu miernika. Jest to miara stopnia dokładności, która dostarcza informacji o największym dopuszczalnym względnym błędzie pomiaru. Podawana jest ona w formie liczby w procentach. Niektórzy producenci nie określają klasy dokładności swoich produktów. W takich przypadkach zamiast błędu całkowitego w specyfikacji technicznej występuje termin „dokładność”. Informacja ta podawana jest w formie składowych jako np. procent wartości wskazanej przez fotometr (skrót rdg od słowa *reading*) plus krotność rozdzielczości (skrót dgt od słowa *digit*).

W przypadku fotometrów, do określenia klasy luksomierzy używa się dużych liter. Rozróżnia się cztery klasy luksomierzy: L (przyrządy o najwyższej dokładności – stosowane np. w laboratoriach wzorcujących), A (o wysokiej dokładności – stosowane np. w laboratoriach fotometrycznych przy pomiarach z wykorzystaniem goniofotometru czy kuli całkującej), B (o średniej dokładności) oraz C (o niskiej dokładności).



Lüksomierz 1



Lüksomierz 2



Lüksomierz 3



Lüksomierz 4



Lüksomierz 5



Lüksomierz 6



Lüksomierz 7

Rys. 4. Zdjęcia luksomierzy, którymi przeprowadzono pomiary

Źródło: opracowanie własne.

Parametry opisujące jakość luksomierzy zdefiniowano w międzynarodowej normie ISO/CIE 19476:2014 [18], w której wyszczególniono aż 18 takich parametrów. W polskim prawodawstwie nie ma obecnie przepisów określających wymagania metrologiczne, jakie powinny być spełnione przez luksomierze wykorzystywane do pomiarów natężenia oświetlenia. Luksomierze od wielu lat nie podlegają prawnej kontroli metrologicznej (legalizacji) co skutkuje wprowadzeniem na rynek wielu przyrządów pomiarowych o wątpliwej jakości. Dopuszczalne wartości błędów dla poszczególnych klas luksomierzy, Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa, opublikowała w raporcie technicznym nr 231 [19]. Graniczne wartości błędu całkowitego zestawiono w tabeli 2. Nie wszyscy jednak producenci zamieszczają tę informację w specyfikacji fotometru.

Tabela 2. Klasy luksomierzy i odpowiadające im wartości błędu całkowitego

Parametr	Klasa luksomierza			
	L	A	B	C
Błąd całkowity	±3,0%	±5,0%	±10,0%	±20,0%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [19].

Na wynik pomiaru istotny wpływ ma także rozdzielczość. Pod pojęciem rozdzielczości luksomierza należy rozumieć najmniejszą wartość, jaka może być zarejestrowana przez fotometr na danym zakresie pomiarowym. Najwyższą rozdzielczością charakteryzuje się luksomierz nr 1, zaś najniższą fotometry o numerach 6 i 7.

W związku ze starzeniem się elementów elektronicznych i optycznych luksomierza, błędy pomiaru mogą przekraczać wartości akceptowane przez użytkownika urządzenia. Wtenczas rozwiązaniem może być przeprowadzenie adjustacji przyrządu pomiarowego. Jest to czynność, która ma na celu doprowadzenie fotometru do stanu działania odpowiadającego jego przeznaczeniu. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że nie wszystkie dostępne na rynku luksomierze umożliwiają przeprowadzenie adjustacji. Wiele przyrządów o niskiej cenie rynkowej nie ma tej funkcji. Spośród fotometrów, które poddano pomiarom, tylko trzy wyposażone są w układy pomiarowe umożliwiające wykonanie adiustacji, co w znaczący sposób pozwala wydłużyć czas eksploatacji i utrzymać dobrą zdolność pomiarową tych przyrządów.

Cechą charakterystyczną luksomierzy, które poddano badaniom jest to, że głowica fotometryczna nie jest zintegrowana z miernikiem wielkości mierzonej. Takie rozwiązanie umożliwia precyzyjne ustalenie geometrii pomiaru, co ma istotne znaczenie np. podczas wzorcowania luksomierzy.

## 2.2. Zakres badań

Zakres badań obejmował przeprowadzenie pomiarów natężenia oświetlenia w pięciu charakterystycznych punktach: 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx. W eksperymencie skorzystano z lampy żarowej o temperaturze barwowej 2856 K (illuminant A),

dwóch lamp wyładowczych: niskoprężnej lampy sodowej LPS (ang. *low pressure sodium*) oraz wysokoprężnej lampy sodowej HPS (ang. *high pressure sodium*), a także trzech źródeł LED (ang. *light emitting diode*) o różnych barwach emitowanego promieniowania. Fotografie źródeł światła wykorzystanych podczas eksperymentu zamieszczono na rysunku 5.

Uwzględnienie w badaniach lampy żarowej może budzić pewne zdziwienie, albowiem z uwagi na niską trwałość oraz skuteczność świetlną (wielkość będącą miarą energooszczędności), źródła te zostały wyparte nie tylko z oświetlenia zewnętrznego, ale także z oświetlenia wnętrza. Warto jednak podkreślić, że w laboratoriach fotometrycznych na terenie naszego kraju nadal korzysta się ze wzorców, którymi są lampy żarowe. Przy użyciu tych lamp wciąż przeprowadza się wzorcowanie luksomierzy. Powodem tego stanu rzeczy jest prosta obsługa (łatwość uzyskania wymaganych parametrów elektrycznych żarówki, szybka stabilizacja strumienia świetlnego, zaledwie kilka – kilkanaście minut), akceptowalna stabilność parametrów elektrycznych i fotometrycznych w czasie, czego nie można powiedzieć w przypadku lamp wyładowczych. Z uwagi na fakt, że na całym świecie wycofywane są lampy żarowe, laboratoria fotometryczne borykają się z problemem związanym z pozyskaniem odpowiednich żarówek, których dostępność z roku na rok spada. Rodzi się zatem pytanie, czy celowym jest dalsze korzystanie z tych lamp?

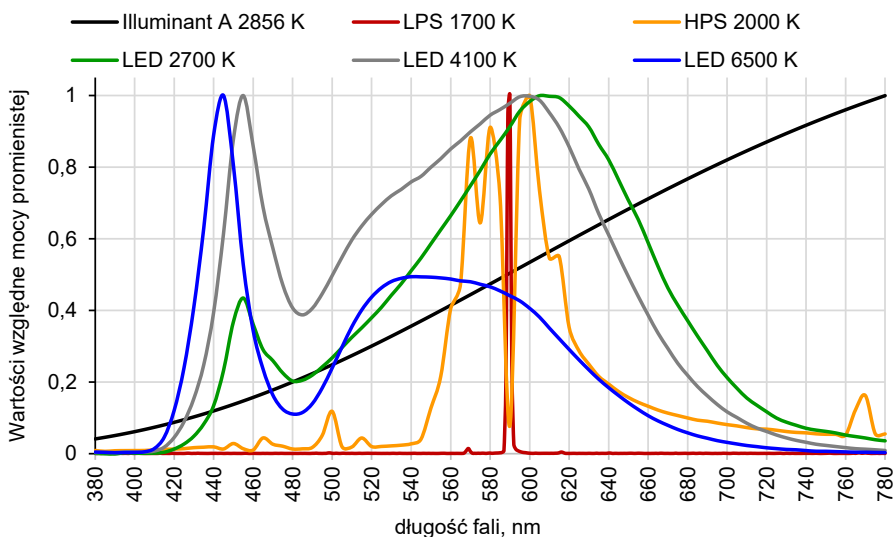
W literaturze [20, 21] podkreśla się zalety nowych, referencyjnych źródeł LED, które zostały ujęte w raporcie technicznym Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE 15:2018 [22]). Niestety aktualnie referencyjne źródła LED nie są jeszcze powszechnie dostępne. Należy jednak oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości, w laboratoriach fotometrycznych źródła te będą stosowane w charakterze wzorców.



**Rys. 5.** Źródła światła wraz z wartościami temperatury barwowej (najbliższej)  
*Źródło: opracowanie własne.*

W przypadku oświetlenia zewnętrznego szczególnie istotną rolę odgrywa efektywność energetyczna. Poziom zużycia energii elektrycznej na potrzeby oświetleniowe zdeterminowany jest m.in. rodzajem zastosowanego źródła światła. Jeszcze do niedawna najpopularniejszymi źródłami światła stosowanymi w oprawach zewnętrznych były lampy wyładowcze. Najwyższą skutecznością świetlną wykazują niskoprężne lampy sodowe (LPS). Światło emitowane z wyładowania łukowego w parach sodu o niskim ciśnieniu jest praktycznie monochromatyczne (rys. 6), co sprawia, że trudno jest mówić o jakimkolwiek oddawaniu barw oświetlanych przedmiotów. Z tego też powodu ich zakres zastosowań jest ograniczony i sprowadzał się zwykle do oświetlania dróg szybkiego ruchu, autostrad, dużych parkingów, czy dużych obszarów zewnętrznych [23, 24]. Warto jednak podkreślić, że z punktu widzenia niepożądanego zjawiska, jakim jest zanieczyszczenie światłem, światło emitowane przez te lampy jest bardzo atrakcyjne (nie zakłóca obserwacji astronomicznych). Z tego też powodu zdecydowano się uwzględnić to źródło światła w badaniach.

W oświetleniu drogowym oraz terenów zewnętrznych powszechne zastosowanie znajdują wysokoprężne lampy sodowe (HPS). Charakteryzują się one stosunkowo wysoką skutecznością świetlną i lepszym oddawaniem barw. Wyładowanie w parach sodu sprawia, że barwa światła jest żółta o temperaturze barwowej około 2000 K. Względny rozkład mocy promienistej lampy sodowej nie jest ciągły, z widocznymi maksimumami w przedziale 560 nm–610 nm.



**Rys. 6.** Względne rozkłady widmowe mocy promieniowania źródeł światła o różnych barwach emitowanego promieniowania

*Źródło: opracowanie własne.*



Niezwykle dynamicznie rozwijającymi się źródłami światła w oświetleniu zewnętrznym są źródła LED. W miastach, a także gminach realizowana jest systematyczna modernizacja oświetlenia. Najczęstszą przesłanką do przeprowadzenia modernizacji oświetlenia zewnętrznego jest poprawa efektywności energetycznej. Idea funkcjonowania białych źródeł LED polega na przekształcaniu przez luminofor wytworzonego przez chip światła niebieskiego. W zależności od składu chemicznego luminoforu możliwym jest uzyskanie barwy światła o różnych temperaturach barwowych. Innymi słowy, luminofor pełni funkcję konwertera światła niebieskiego na światło białe. Konsekwencją takiego mechanizmu wytwarzania światła będą dwa „wzniesienia” widoczne na rozkładzie względnej mocy promienistej. Pierwsze, którego maksimum przypada zwykle w przedziale długości fal 430 nm–480 nm, to promieniowanie emitowane przez diodę niebieską; drugie zaś jest efektem odpowiedzi luminoforu.

W rozważaniach uwzględniono źródła LED o barwie ciepłej (2700 K), neutralnej (4100 K) oraz chłodnej (6500 K). Ze względu na wysoką skuteczność świetlną początkowo w oświetleniu zewnętrznym powszechnie stosowano źródła LED o temperaturach barwowych powyżej 5000 K. Niestety, wraz ze wzrostem temperatury barwowej w widmie promieniowania lamp, zwiększa się zawartość promieniowania niebieskiego, co jest zjawiskiem niepożądanym w kontekście zanieczyszczenia światłem. Jak wynika z literatury [25, 26] promieniowanie krótkofalowe intensywniej rozprasza się w atmosferze potęgując efekt zanieczyszczenia światłem. Z tego też powodu, rekomendowane są źródła LED o niższych temperaturach barwowych.

### 2.3. Opis metodyki przeprowadzenia badań

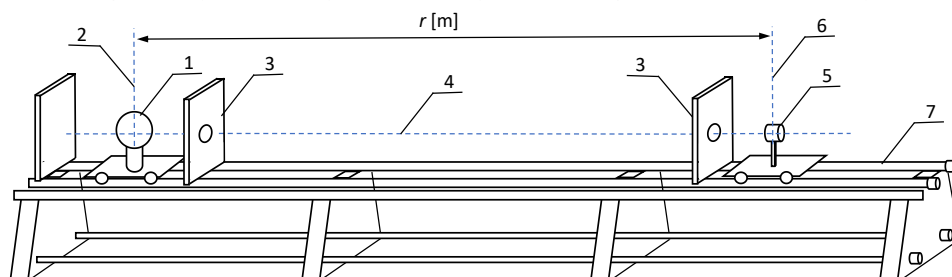
Wzorcowanie luksomierzy przeprowadza się w specyficznych warunkach – przy istotnie ograniczonym oświetleniu w pomieszczeniu. Badany miernik umieszcza się na ławie fotometrycznej, która znajduje się w ciemni fotometrycznej (pomieszczeniu, którego ściany i sufit pokryte są czarną, matową farbą).

Na potrzeby przeprowadzenia eksperymentu, skorzystano ze stanowiska pomiarowego będącego własnością Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi, podmiotu akredytowanego przez Polskie Centrum Akredytacji, m.in. w zakresie wzorcowania luksomierzy (nr AP 087). Stanowisko przeznaczone do wzorcowania luksomierzy znajduje się w specjalnie przystosowanym do tego celu pomieszczeniu Pracowni Fizykochemii, w ciemni fotometrycznej.

Głównym elementem stanowiska jest ława fotometryczna o długości 6,5 m. Wyposażona jest ona w elementy i przyrządy umożliwiające precyzyjne ustalenie geometrii pomiaru. Parametry elektryczne lamp zainstalowanych na stanowisku pomiarowym są kontrolowane za pomocą amperomierza i woltomierza. Wszystkie wzorce i przyrządy pomiarowe, mające wpływ na wyniki pomiarów na stanowisku pomiarowym, są wzorcowane z ustaloną częstością przez akredytowane pracownie Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi lub przez laboratoria Głównego Urzędu Miar

w Warszawie. Jako przyrząd odniesienia zastosowano luksomierz laboratoryjny typu I-500 produkcji LMT (klasa L).

Podczas pomiarów były monitorowane warunki środowiskowe (temperatura otoczenia, wilgotność). Strukturę stanowiska pomiarowego zamieszczono na rysunku 7.



**Rys. 7.** Schemat układu pomiarowego: 1 – źródło światła, 2 – oś symetrii lampy, 3 – przesłona, 4 – oś optyczna, 5 – głowica fotometryczna luksomierza, 6 – oś pionowa, stykająca się z częścią czynną głowicy fotometrycznej, 7 – ława fotometryczna

*Źródło: opracowanie własne.*

Na jednym z końców ławy fotometrycznej (7) umieszczono wzorec światłości (lampę żarową), którą zasilono ze stabilizowanego źródła prądu stałego. Lampę wzorcową ustawiono w taki sposób, aby płaszczyzna żarnika znajdowała się wzdłuż osi pionowej (2), (osi symetrii lampy), prostopadłej do osi optycznej ławy. W pobliżu lampy zamieszczono przesłonę, ograniczającą niepożądane światło rozproszone. W pewnej odległości  $r$ , na ławie fotometrycznej, za przesłoną (3), na ruchomym wózku zainstalowano głowicę fotometryczną luksomierza. Zadbane, aby środek części czynnej głowicy fotometrycznej znajdował się w osi optycznej ławy fotometrycznej. Pomiar wykonano po upływie minimum 15 minut od momentu ustawienia wymaganych parametrów elektrycznych lampy wzorcowej podanych w świadectwie wzorcowania. Wzorcowanie luksomierza przeprowadzono w 5 charakterystycznych punktach (1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx).

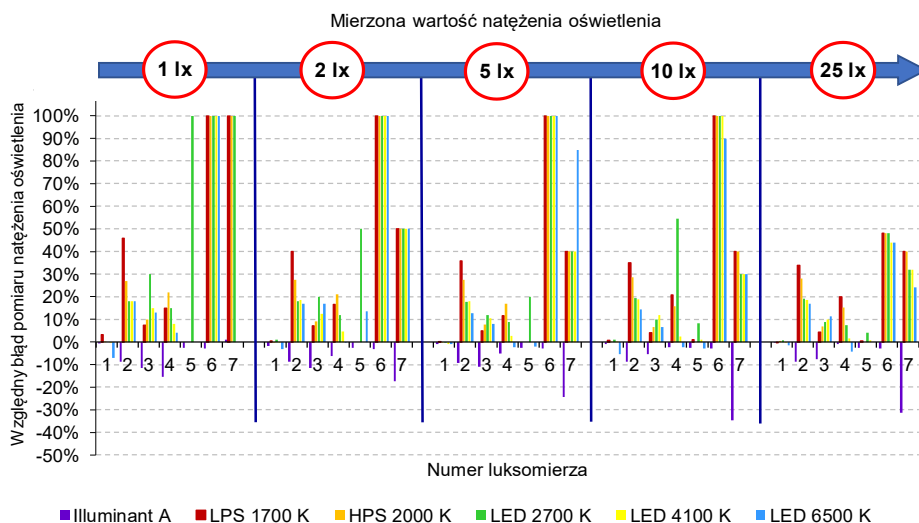
W dalszej części badań, wzorcowe źródło światła zastąpiono odpowiednio lampami sodowymi oraz źródłami LED. W pomiarach wykorzystano luksomierz odniesienia (luksomierz wzorcowy). Zmieniając na ławie fotometrycznej odległość pomiędzy źródłem światła a luksomierzem, można uzyskać żądaną wartość natężenia oświetlenia.

### 3. Wizualizacja rezultatów przeprowadzonych pomiarów

#### 3.1. Względny błąd pomiaru natężenia oświetlenia

Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych pomiarów, dla poszczególnych wartości mierzonego natężenia oświetlenia różnymi luksomierzami,

obliczono względny błąd pomiaru. Rezultaty zilustrowano graficznie na rysunku 8. Oś rzędnych reprezentuje względny błąd pomiaru zmierzonego natężenia oświetlenia, natomiast oś odciętych numer luksomierza, który poddano pomiarom. Numeracja luksomierzy jest tożsama z tą przyjętą w tabeli 1. oraz na rysunku 4.



**Rys. 8.** Zestawienie obliczonych wartości względnego błędu pomiaru natężenia oświetlenia przeprowadzonego różnymi luksomierzami, przy różnych źródłach światła

*Źródło: opracowanie własne.*

Analizując dane zestawione na rysunku 8 można dostrzec, że na względny błąd pomiaru poszczególnych luksomierzy wpływ ma nie tylko rodzaj użytego w eksperymencie źródła światła, ale także mierzona wartość natężenia oświetlenia. Uogólniając, można zauważyć, że największe wartości błędów występują przy pomiarze małych wartości natężenia oświetlenia (szczególnie dla 1 lx). Wraz ze wzrostem mierzonej wartości, względny błąd pomiaru maleje.

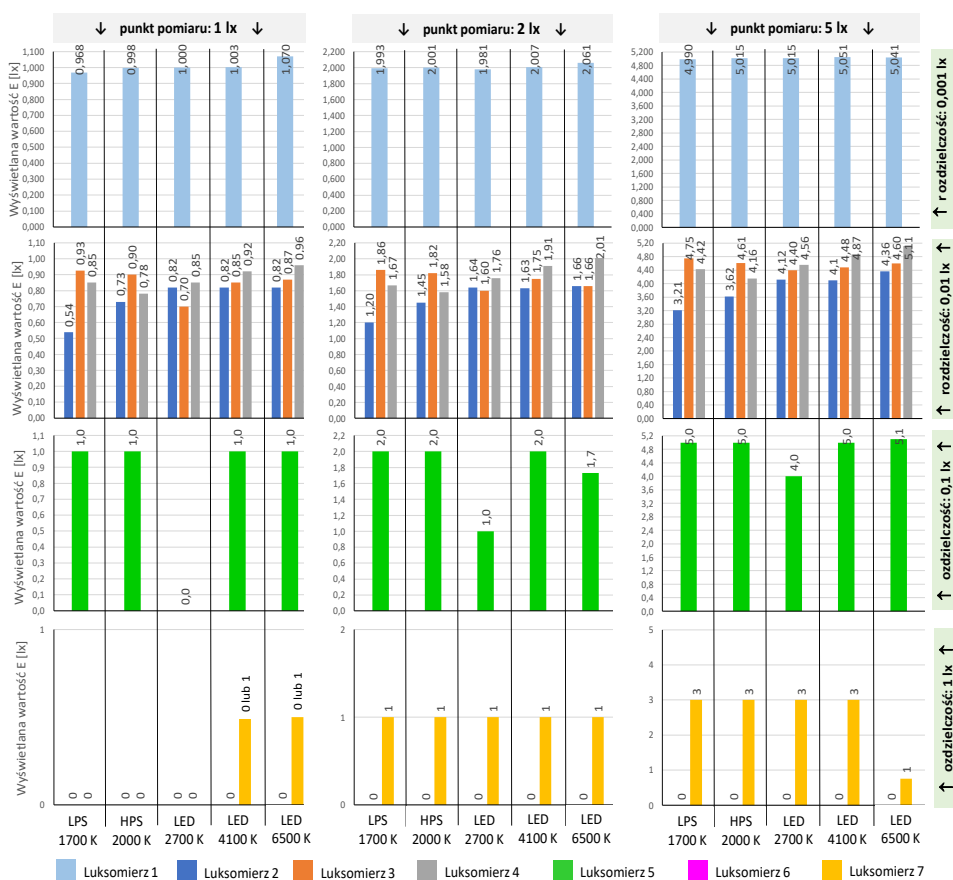
Dodatnie wartości błędu mają miejsce wtenczas, gdy wskazania fotometrów są mniejsze od tych uzyskanych przy luksomierzu odniesieniowym (wzorcowym). Błędy, których wartości są mniejsze od zera dotyczą przypadków, kiedy wskazania badanych luksomierzy są zawyżone.

### 3.2. Uzyskane wskazania luksomierzy

W celu zwrócenia uwagi na praktyczne problemy związane z pomiarami niskich wartości natężenia oświetlenia, na rysunku 9, dla trzech punktów pomiaru (1 lx, 2 lx i 5 lx) zamieszczono uzyskane wyniki wskazań poszczególnych luksomierzy, których głowice fotometryczne oświetlono lampami o różnych charakterystykach widmowych. Rezultaty pomiarów dla pozostałych dwóch punktów (10 lx i 25 lx) zestawiono na rysunku 10. Tym razem na osiach rzędnych podano wartości wielkości mierzonej,

a na osiach odciętych symbol źródła światła wraz z wartością temperatury barwowej najbliższej. Liczba miejsc po przecinku, przy prezentowaniu zmierzonych wartości natężenia oświetlenia wynika z rozdzielczości użytego luksomierza.

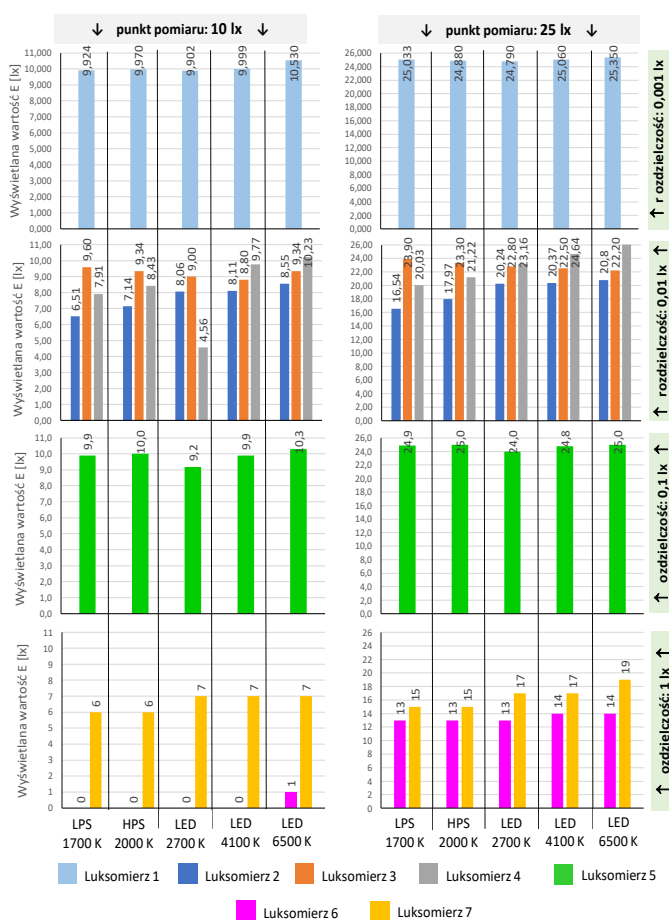
Pomimo stałych warunków oświetleniowych widoczne są rozbieżności pomiędzy nominalnymi wartościami natężenia oświetlenia, a tymi zarejestrowanymi przez poszczególne fotometry. Bez względu na rodzaj użytego w eksperymencie źródła światła oraz mierzoną wartość (punkt pomiaru), nieznaczne różnice odnotowano w przypadku luksomierza 1, co upoważnia do stwierdzenia, że wyniki pomiarów uzyskane za pomocą tego luksomierza są najbardziej wiarygodne. Najmniej optymistyczne rezultaty uzyskano w przypadku luksomierzy o numerach 6 i 7. Bez względu na rodzaj zastosowanego źródła światła, luksomierz 6 przy pomiarach w punktach 1 lx, 2 lx oraz 5 lx wskazuje wartość równą zero.



**Rys. 9.** Wskazania luksomierzy dla punktów pomiarowych 1 lx, 2 lx, 5 lx przy ekspozycji na promieniowanie emitowane przez lampy stosowane w oświetleniu zewnętrznym

Źródło: opracowanie własne.

Wartość różna od zera wyświetlana jest przez fotometr dopiero w punkcie 10 lx, ale jedynie przy ekspozycji na promieniowanie emitowane przez źródło LED o chłodnej barwie światła (6500 K). W przypadku luksumierza 7, w punkcie pomiaru 1 lx przy lampach wyładowczych (LPS i HPS) oraz źródle LED o ciepłej barwie światła wyświetlana jest wartość 0 lx. Przy świetle emitowanym przez źródła LED o temperaturach barwowych najbliższych 4100 K i 6500 K, na fotometrze numer 7 na przemian wyświetlane są wartości 0 lx i 1 lx. Stabilne wskazania luksumierza są w punktach od 2 lx wzwyż. Należy jednak zauważyć, że wyświetlane wartości natężenia oświetlenia są zaniżone. Oznacza to, że przy ocenie poziomu światła przeszkadzającego, uzyskane wartości pionowego natężenia oświetlenia mogą prowadzić do błędnych wniosków.



Rys. 10. Wskazania luksumierzy dla punktów pomiarowych 10 lx i 25 lx przy ekspozycji na promieniowanie emitowane przez lampy stosowane w oświetleniu zewnętrznym

Źródło: opracowanie własne.

### 3.3. Wyniki wzorcowania luksomierzy o rozdzielczości 1 lx

Analizując dane zamieszczone na rysunkach 8–10 można stwierdzić, że luksomierze o numerach 6 i 7 nie są odpowiednie do pomiarów natężenia oświetlenia. Stwierdzenie takie jest słuszne, ale przy pomiarach niskich wartości natężenia oświetlenia (nieprzekraczających 25 lx). Przy większych poziomach mierzonego natężenia oświetlenia (występujących np. na stanowiskach pracy we wnętrzach), błędy pomiaru będą znacznie niższe.

W celu zilustrowania problemu, w tabeli 3. zamieszczono wyniki wzorcowania dla 9 luksomierzy dwóch typów. Pierwszy typ odpowiada luksomierzowi nr 6, drugi typ luksomierzowi nr 7. Poszczególne egzemplarze luksomierzy oznaczono literami od a do i. Zamieszczona przed literą cyfra oznacza typ luksomierza. Zestawione w tabelach wartości błędów względnych uzyskano na podstawie przeprowadzonych pomiarów w latach 2019–2021. Pomiary wykonano w sześciu punktach: 200 lx, 1000 lx, 1900 lx, 2000 lx, 5000 lx oraz 10000 lx.

Tabela 3. Wyniki wzorcowania kilku luksomierzy dwóch typów

Wartość nominalna	Względny błąd pomiaru w %								
	Luksomierze								
	6a	6b	6c	6d	6e	6f	6g	6h	6i
200	-18,7	3,6	-13,8	-5,7	-17,0	-17,0	-4,8	-6,1	-4,8
1000	-17,4	3,3	-13,3	-4,5	-16,2	-16,2	-3,7	-3,9	-2,9
1900	-17,1	3,2	-13,3	-4,3	-16,1	-16,1	-3,7	-3,8	-2,5
2000	-17,1	2,7	-16,0	-7,7	-15,9	-15,9	-5,9	-7,1	-5,8
5000	-16,3	2,0	-15,3	-7,0	-14,8	-14,8	-5,0	-5,1	-4,6
10000	-16,9	1,0	-16,6	-7,4	-15,2	-15,2	-5,3	-5,5	-4,8
Wartość nominalna	Luksomierze								
	7a	7b	7c	7d	7e	7f	7g	7h	7i
	200	-2,0	-1,0	-0,5	-2,4	-1,5	-14,2	12,4	-2,0
1000	-1,3	-0,2	-0,4	-1,9	-1,5	-13,8	12,4	-1,2	-0,9
1900	-0,8	0,2	-0,3	-1,9	-1,6	-13,7	12,4	-0,6	-0,5
2000	-0,4	0,3	-0,2	-1,4	-1,6	-13,5	12,5	0,3	-0,3
5000	0,7	0,9	0,3	-0,7	-1,7	-13,0	12,9	1,3	1,0
10000	1,2	2,1	0,1	-0,8	-1,6	-12,8	12,8	2,1	1,5

Źródło: opracowanie własne.

Wybrane do badań egzemplarze są próbką luksomierzy dostępnych na rynku polskim i nie należy ich traktować jako reprezentatywne dla danego typu. Luksomierze mogą się różnić jakością metrologiczną w obrębie tego samego typu, jednak zwykle obserwuje się błędy wskazania na podobnym poziomie. W przypadku luksomierzy tego samego typu co luksomierz numer 6, rozbieżności pomiędzy wartościami wyznaczonego błędu względnego dla poszczególnych przyrządów są głównie związane z wykonaną przed wzorcowaniem adiustacją. Adiustację wykonuje się na życzenie użytkownika luksomierza i nie zawsze jest ona możliwa ze względów technicznych.

## 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można sformułować następujące wnioski praktyczne. Wielu użytkowników luksomierzy, niezajmujących się na co dzień profesjonalnymi pomiarami natężenia oświetlenia uważa, że jeśli dolna wartość zakresu pomiarowego fotometru wynosi 0 lx i luksomierz został wywzorcowany, to bez względu na mierzoną wartość, wskazania można uznać za wiarygodne. Przyjęcie takiego założenia jest błędne, co potwierdzają zamieszczone wyniki pomiarów. Przy pomiarach małych wartości natężenia oświetlenia wpływ (związany z użytym przyrządem) na wynik pomiaru mają m.in.: rozdzielczość przyrządu, wartość wielkości mierzonej, dopasowanie widmowe głowicy fotometrycznej oraz dokładność przyrządu.

Wpływ rozdzielczości na błąd pomiaru jest odwrotnie proporcjonalny do wartości mierzonej. Im niższa jest mierzona wartość natężenia oświetlenia, tym większe znaczenie ma rozdzielczość przyrządu. Prawdopodobnie tę można dostrzec, analizując wyniki pomiarów otrzymane dla luksomierza numer 1 o rozdzielczości 0,001 lx i luksomierzy o numerach 6 i 7 o rozdzielczości 1 lx. Najmniejsze błędy pomiaru otrzymano w przypadku luksomierza opatrzonego numerem 1. Najmniej optymistyczne wyniki pomiarów uzyskano w przypadku luksomierzy o rozdzielczości 1 lx. Wyniki pomiarów zilustrowane graficznie na rysunkach 8, 9 i 10 wskazują na nieużyteczność tych fotometrów przy pomiarach natężenia oświetlenia o wartościach mniejszych niż 25 lx. W przypadku pomiarów wartości 1 lx i 2 lx dla omawianych luksomierzy błędy względne pomiaru przyjmują znaczne wartości (nawet 100%), wobec czego nie powinny być one używane podczas pomiarów małych wartości natężenia oświetlenia.

Do interesujących spostrzeżeń można dojść zestawiając uzyskane wartości błędów w przypadku luksomierza numer 5 o rozdzielczości 0,1 lx z danymi uzyskanymi dla luksomierzy opatrzonych numerami 2, 3 i 4, których rozdzielczość wynosi 0,01 lx. Jeśli pominąć wyniki pomiarów z wykorzystaniem źródła LED o ciepłej barwie światła (2700 K), to wartości względnego błędu pomiaru natężenia oświetlenia są mniejsze w przypadku luksomierza o niższej rozdzielczości. Oznacza to, że nie w każdym przypadku pomiar wykonany przyrządem o wyższej rozdzielczości tożsamy jest z większą precyzją pomiaru (mniejszym błędem pomiaru).

Jakość wykonania poszczególnych elementów przyrządu pomiarowego ma duży wpływ na wyniki pomiarów. W przypadku luksomierzy szczególnie istotną rolę odgrywa stopień dopasowania względnej czułości widmowej głowicy fotometrycznej do krzywej  $V(\lambda)$ , opracowanej przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE. Wobec faktu, że krzywa czułości widmowej detektorów krzemowych, w które obecnie wyposaża się głowice fotometryczne luksomierzy, znacznie różni się od wymaganej krzywej  $V(\lambda)$ , zachodzi potrzeba zastosowania filtrów. Od rodzaju i liczby zastosowanych filtrów zależy stopień odwzorowania krzywej  $V(\lambda)$ . Im większe będą odstępstwa pomiędzy krzywą czułości widmowej głowicy fotometrycznej luksomierza a tą opracowaną przez CIE, tym większy wpływ na wyniki pomiarów będzie miał

rozkład widmowy mocy promienistej promieniowania emitowanego przez oprawę oświetleniową. Jest to zagadnienie szczególnie ważne ze względu na dużą różnorodność stosowanych obecnie źródeł światła. W przypadku fotometrów, które poddano pomiarom, bez względu na rodzaj użytego źródła światła, małe wartości błędów uzyskano w odniesieniu dla luksomierzy o numerach 1 i 5, co może świadczyć o bardzo dobrej korekcji widmowej głowic fotometrycznych. Inaczej sytuacja przedstawia się w przypadku luksomierza 2. Można tu dostrzec (pomimo stałych warunków oświetleniowych) pewną zależność uzyskanych wskazań od rozkładu widmowego mocy promienistej lamp. Wraz ze wzrostem temperatury barwowej najbliższej odnotowano mniejsze wartości błędów pomiaru. Prawidłowość tę można zaobserwować przy wszystkich mierzonych wartościach natężenia oświetlenia (1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx).

Zamieszczone w pracy wyniki pomiarów oraz obliczeń odnoszą się do konkretnych egzemplarzy luksomierzy. Wskazania przyrządów o innych numerach fabrycznych będą się różnić od tych zaprezentowanych tutaj. Należy też mieć na uwadze fakt, że pomiary przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. W przypadku pomiarów terenowych, różnice w wynikach pomiarów zarejestrowanych poszczególnymi luksomierzami będą się różnić od tych otrzymanych w ciemni fotometrycznej.

Z uwagi na fakt, że to użytkownik przyrządu pomiarowego ponosi odpowiedzialność za wykonane pomiary, kwestia wyboru luksomierza jest bardzo istotna. Z pewnością do pomiarów natężenia oświetlenia w kontekście oceny zanieczyszczenia światłem nie nadają się luksomierze 6 i 7, których rozdzielczość wynosi 1 lx. Jaki więc zatem luksomierz wybrać? Udzielenie odpowiedzi na to pytanie nie jest łatwe. Wiarygodnych wyników pomiarów niewątpliwie należy oczekiwać w przypadku luksomierzy klasy A i o rozdzielczości 0,001 lx. Wobec faktu, że niskie poziomy natężenia oświetlenia występują w przypadku oceny oświetlenia awaryjnego, do oceny zanieczyszczenia światłem słusznym wydaje się zarekomendowanie luksomierzy przewidzianych do pomiarów oświetlenia ewakuacyjnego. Luksomierz taki powinien mieć na pierwszym zakresie pomiarowym rozdzielczość nie mniejszą niż 0,01 lx, a całkowity błąd pomiaru (zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 1838 [27]), nie powinien przekraczać 10%. Wskazane jest także, aby luksomierz był wywzorcowany, szczególnie w zakresie małych wartości natężenia oświetlenia.

Uzyskane wyniki pomiarów laboratoryjnych wskazują, że zarejestrowane wartości natężenia oświetlenia dla większości luksomierzy (w przypadku lamp stosowanych w oświetleniu zewnętrznym) są zaniżone. Należy mieć na uwadze fakt, że w przypadku wykonywania pomiarów w terenie, warunki tam panujące będą znacznie odbiegać od tych mających miejsce podczas badań laboratoryjnych. Można więc spodziewać się, że błędy pomiaru przyjmą większe wartości. Oznacza to, że pomimo przekroczenia granicznych wartości pionowego natężenia oświetlenia, konkluzje zawarte w protokole badań nie będą wskazywały na ewentualne nieprawidłowości.

Zagadnienie pomiarów natężenia oświetlenia z wykorzystaniem różnych luksomierzy oraz źródeł światła jest na tyle rozległe, że można by mu poświęcić obszerną



pracę. Z tego też powodu poruszona problematyka nie może być uznana za wyczerpaną. Autorzy przewidują kontynuowanie badań i sukcesywne publikowanie uzyskanych rezultatów.

## Literatura

- [1] Boyce P.R., Eklund N.H., Hamilton B.J., Bruno L.D., *Perceptions of safety at night in different lighting conditions*, *Lighting Research & Technology*, 2000, 32, 2, s. 79–91, DOI: 10.1139/er-2014-0041.
- [2] Haans A., De Kort Y.A.W., *Light distribution in dynamic street lighting: two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape*, *Journal of Environmental Psychology*, 2012, 32, s. 342–352, DOI: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006.
- [3] Lorenc T., Petticrew M., Whitehead M., Neary D., Clayton S., Wright K., Thomson H., Cummins S., Sowden A., Renton A., *Fear of crime and the environment: systematic review of UK qualitative evidence*, *BMC Public Health*, 2013, 13, s. 496, DOI: 10.1186/1471-2458-13-496.
- [4] Bereszyński M., *XXI wiek, a w Łodzi nadal ciemno*, *Dziennik Łódzki* z dn. 26.08.2011.
- [5] Tabaka P., Rózga P., *Influence of a Light Source Installed in a Luminaire of Opal Sphere Type on the Effect of Light Pollution*, *Energies* 2020, 13, 2, s. 306, DOI: 10.3390/en13020306.
- [6] Tabaka P., *Pilot Measurement of Illuminance in the Context of Light Pollution Performed with an Unmanned Aerial Vehicle*, *Remote Sensing*, 2020, 12, 13, DOI: 10.3390/rs12132124.
- [7] Górczewska M., *Oświetlenie dróg publicznych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, nr 4, s. 100–102.
- [8] Raczak A., Zalesińska M., Wandachowicz K., *Modyfikacja wyposażenia szklarni w kurtyny jako sposób na zmniejszenie zanieczyszczenia światłem oraz poprawę efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej – stadium przypadku* [w:] Andrzej Kotarba (red.) *Zanieczyszczenie światłem – źródła, obserwacje, skutki*, Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 2019, s. 121–136.
- [9] PN-EN 12464-2:2008 Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.
- [10] PN-EN 12464-2:2014-05 Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.
- [11] *CIE 150:2003 Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light*, International Commission on Illumination, 2017, DOI: 10.25039/TR.150.2017.
- [12] Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 8 kwietnia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2019 r., poz. 1065).
- [13] Skwarło-Sońta K., *Skażenie światłem: co dziś wiemy o jego wpływie na funkcjonowanie organizmu człowieka?*, *Kosmos*, 2015, t. 64, nr 4, s. 633–642.
- [14] Skarżyński K., *Penetracja światłem obiektu iluminowanego w kontekście polskich wymagań normatywnych*, *Polish Journal for Sustainable Development*, 2017, 21, 2, s. 107–116, DOI: 10.15584/pjdsd.2017.21.2.12.

- [15] Śląska Okręgowa Izba Architektów Rzeczypospolitej Polskiej, Projekt Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 11 maja 2016 r., [http://slaska.iarp.pl/wp-content/uploads/2016/05/dokument221821\\_l.pdf?akcja=pobierz](http://slaska.iarp.pl/wp-content/uploads/2016/05/dokument221821_l.pdf?akcja=pobierz) (dostęp: 17.12.2021).
- [16] Banaszak A., Tabaka P., Wtorkiewicz J., *Analiza wybranych właściwości różnych typów luksomierzy*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 2015, z. 268, s. 83–100.
- [17] Tabaka P., Wtorkiewicz J., *Ocena przydatności świadectwa wzorcowania luksomierza w odniesieniu do wybranych problemów przy pomiarach fotometrycznych* [w:] *Metrologia naukowa, normatywna i przemysłowa – wybrane zagadnienia*, J. Roj (red.), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020, s. 63–76.
- [18] ISO/CIE 19476:2014 Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters.
- [19] CIE 231:2019 Classification System of Illuminance and Luminance Meter.
- [20] Pulli T., Dönsberg T., Poikonen T., Manoocheri F., Kärhä P., Ikonen E., *Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry*, Light: Science & Applications, 2015, 4, e332, DOI: 10.1038/lsa.2015.105.
- [21] Kokka A., Poikonen T., Blattner P., Jost S., Ferrero A., Pulli T., Ngo M., Thorseth A., Gerloff T., Dekker P., Stuker F., Klej A., Ludwig K., Schneider M., Reiners T., Ikonen E., *Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry*, Metrologia, 2018, 55, 4, s. 526–534, DOI: 10.1088/1681-7575/aacae7.
- [22] CIE 15:2018 Colorimetry. International Commission on Illumination, 2018, DOI: 10.25039/TR.015.2018.
- [23] Wiśniewski A., *Elektryczne źródła światła*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [24] Wiśniewski A., *Źródła światła*, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2013.
- [25] Strutt, J.W., *On the transmission of light through an atmosphere containing many small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky*, Philosophical Magazine, 1899, 47, s. 375–384.
- [26] Sakurada, Y., Nakamura, T., *Demonstration of the light scattering phenomenon in the atmosphere*, [w:] *Seventh International Conference on Education and Training in Optics and Photonics, Singapore, 26–30 November 2001*, Proceedings of SPIE, vol. 4588, s. 490–498.
- [27] PN-EN 1838:2013–11 Zastosowanie oświetlenia. Oświetlenie awaryjne.

## INFLUENCE OF APPLIED ILLUMINANCE METER ON THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF LIGHT INTENSITY IN THE CONTEXT OF LIGHT POLLUTION

**Abstract:** The article presents the results of illuminance measurements for seven types of luxmeters using six light sources with different values of the correlated color temperature. The measurements were carried out at the characteristic points for the assessment of light immission: 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx and 25 lx. The results clearly indicate that in the constant lighting conditions, the accuracy of the measurement depends on the appropriate selection of the measuring instrument, in particular its resolution. The spectral characteristics of the radiation emitted by various light sources are also important.

**Keywords:** illuminance meter, calibration, resolution, measurement error, light sources

# STUDIUM PRZYPADKU WPŁYWU OŚWIETLENIA PARKU NA ZANIECZYSZCZENIE ŚWIATŁEM PRZY WYKORZYSTANIU SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

## Przemysław Tabaka

Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka  
*przemyslaw.tabaka@p.lodz.pl*

## Karolina Rzezicka

Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka  
*223886@p.lodz.pl*

**Streszczenie:** W pracy zaprezentowano wyniki obliczeń symulacyjnych ilustrujących wpływ oświetlenia parkowego na emisję strumienia świetlnego w górną półprzestrzeń. Korzystając z programu komputerowego DIALux 4.13. opracowano trójwymiarowy model parku w Białkowie. Poza rozmieszczeniem alejek parkowych wraz z latarniami dodatkowo w rozważaniach uwzględniono także scenariusze, w ramach których przeanalizowano wpływ budynków oraz roślinności na wartość strumienia świetlnego wysyłanego w kierunku nieboskłonu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można zauważyć znaczące zmiany natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej w zależności od zamodelowania infrastruktury parku. Obliczenia przeprowadzono równolegle na dwóch komputerach o różniących się mocach obliczeniowych. Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, że poza mocą obliczeniową komputera, na czas trwania obliczeń istotny wpływ ma również uwzględnienie w modelu parku roślinności.

**Słowa kluczowe:** projektowanie oświetlenia, oprawa oświetleniowa, zanieczyszczenie światłem, park, obserwatorium astronomiczne

## 1. Wstęp

Oświetlenie terenów zielonych (skwerów, parków) jest istotnym elementem infrastruktury zarówno miejskiej, jak i podmiejskiej. Pełni ono ważną funkcję użytkową, m.in. poprawia poczucie bezpieczeństwa spacerowiczów, umożliwia pokonanie ewentualnych przeszkód [1, 2, 3, 4]. Z użytkowaniem oświetlenia elektrycznego wiąże się jednak emisja światła w górną półprzestrzeń, która jest źródłem zanieczyszczenia światłem. Problem ten jest szczególnie istotny dla osób prowadzących obserwacje astronomiczne nocnego nieba [5]. Z uwagi na zasięg zanieczyszczenia światłem, zagadnienie to nabiera bardzo istotnej rangi, co wymusza podjęcie działań zaradczych, które mogą być realizowane już na etapie projektowania oświetlenia.

Dzięki gwałtownemu rozwojowi techniki komputerowej, nieocenionym narzędziem przy projektowaniu oświetlenia i tworzeniu wizualizacji są programy komputerowe. Za ich pomocą można stworzyć dowolny trójwymiarowy kompleks zieleni wraz z infrastrukturą oświetleniową i dokonać obliczeń oświetleniowych. Przeniesienie rzeczywistych obiektów do wirtualnej rzeczywistości jest jednak zadaniem czasochłonnym. Wierność odwzorowania obiektów determinuje ich realizm. Warto jednak zaznaczyć, że stopień wierności odwzorowania trójwymiarowych modeli ma istotny wpływ na czas obliczeń. Powstaje zatem uzasadnione pytanie, jak stopień wierności odwzorowania rzeczywistych obiektów wpływa na wyniki obliczeń, na podstawie których dokonywana jest ocena zanieczyszczenia światłem, którego źródłem jest infrastruktura oświetleniowa? W celu udzielenia odpowiedzi na to pytanie, przeprowadzono obliczenia dla trójwymiarowego modelowego parku, rozważając kilka wariantów.

Należy podkreślić, że istnieje kilka metod oceny wpływu zewnętrznych instalacji oświetleniowych na zjawisko zanieczyszczenia światłem. Jednym ze sposobów ilościowej oceny wzrostu jasności nocnego nieba jest posłużenie się miernikiem SQM (ang. *Sky Quality Meter*) [6]. Tego typu urządzenia zazwyczaj instaluje się na dachach budynków (np. obserwatoriów astronomicznych) [7]. Możliwym jest także przeprowadzenie pomiarów terenowych [8]. Jednak w celu sformułowania rzeczowych wniosków, zachodzi potrzeba przeprowadzenia wielu pomiarów rozłożonych w czasie, albowiem na zanieczyszczenie światłem mają wpływ także warunki pogodowe (np. zachmurzone niebo). Jak wynika z literatury, chmury przyczyniają się do wzrostu luminancji nocnego nieba [9].

Inną z metod oceny wpływu instalacji oświetleniowych na zanieczyszczenie światłem jest wykorzystanie dronów [10, 11]. Instalując na pokładzie drona specjalistyczną aparaturę pomiarową, można dokonać oceny wpływu konkretnej instalacji oświetleniowej na efekt zanieczyszczenia światłem. Warto jednak zaznaczyć, że rozwiązanie to jest bardzo kosztowne. Ceny specjalistycznych dronów (umożliwiających zainstalowanie aparatury pomiarowej) są wysokie, do tego dochodzi jeszcze koszt sprzętu pomiarowego, którego cena może przekroczyć koszt zakupu drona.

Oczywiście operator drona powinien legitymować się stosownym świadectwem kwalifikacyjnym.

Biorąc pod uwagę koszty (czy to finansowe – wynikające z zakupu specjalistycznego sprzętu, czy to „czasowe” – wynikające z potrzeby rozłożenia pomiarów w czasie) w pracy zdecydowano do oceny zanieczyszczenia światłem wykorzystać oprogramowanie komputerowe. Jego największą zaletą jest to, że można zasymulować różne scenariusze bez ponoszenia nakładów finansowych. Istnieje kilka programów komputerowych do projektowania oświetlenia [12, 13, 14, 15]. Do zamodelowania trójwymiarowego parku zdecydowano się skorzystać z popularnego programu komputerowego DIALux.

## 2. Opis lokalizacji i charakterystyka parku w Białkowie

Białków to wieś znajdująca się w województwie dolnośląskim, oddalona od Wrocławia o około 50 km. Miejscowość charakteryzuje się dużą liczbą terenów rolniczych oraz lasów, znajduje się tam zaledwie kilka domów mieszkalnych (rys. 1).



Rys. 1. Poglądowa ilustracja położenia parku w Białkowie

Źródło: opracowanie własne na podstawie mapy Google.

Obserwatorium astronomiczne w Białkowie, które obecnie jest Ośrodkiem Edukacji Astronomicznej Uniwersytetu Wrocławskiego, składa się z kilku budynków [16]. W pawilonie A (rys. 2) wyposażonym w kopułę o średnicy blisko 6 m znajduje się refraktor, który jest głównym instrumentem obserwatorium. W budynku B znajduje się instrument przejściowy z obiektywem 2,5 cala, natomiast w pawilonie C umieszczono szukacz komet. Z obserwatorium w kierunku pałacu (dawnego domu

mieszkalnego należącego do von Wutschichowsky) prowadzi zabudowany korytarz – łącznik D. Sam pałac jest neogotyckim budynkiem z czerwonej cegły, wzniesionym przez astronoma–amatora Leo Wutschichowsky’ego w latach 1854–1927 [17]. Nakryty jest dwuspadowym dachem o niewielkim nachyleniu połaci. W bryle budynku znajdują się dwie wieże. Zespół budynków otacza zabytkowy park o powierzchni około 2 ha. Całość parku jest ogrodzona. Poza ogrodzeniem znajduje się parking dla odwiedzających.

Po remoncie pałacu oraz rewitalizacji parku, wzdłuż głównych alejek parkowych oraz parkingu zainstalowano latarnie. Lokalizację poszczególnych słupów oświetleniowych naniesiono na planie sytuacyjnym (rys. 2). Na tym samym planie zamieszczono położenie poszczególnych budynków oraz zdjęcia wykonane z kilku miejsc parku. Miejsca, z których wykonano zdjęcia, zaznaczono strzałkami.



Rys. 2. Poglądowa ilustracja rozmieszczenia alejek, latarni oraz budynków w parku

Źródło: opracowanie własne.


### 3. Różne warianty trójwymiarowego modelu parku

#### 3.1. Dane na temat zastosowanych opraw oświetleniowych

Na słupach oświetleniowych o wysokości 4,5 m zainstalowano oprawy oświetleniowe wykonane w technologii LED o dwóch rodzajach układów optycznych SP i ME. Według informacji producenta oprawy oświetleniowe optyka SP przewidziana jest do oświetlania wąskich ciągów pieszych, natomiast optyka ME do ciągów

szerszych, w tym parkingów. Informacje na temat podstawowych danych technicznych opraw oświetleniowych zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne dotyczące opraw oświetleniowych, które zainstalowano na słupach oświetleniowych w parku w Białkowie

Parametr	Wartość	Zdjęcie oprawy oświetleniowej
Moc czynna pobierana przez oprawę oświetleniową ( $P$ )	30 W	
Całkowity strumień świetlny źródeł światła ( $\Phi$ )	4000 lm	
Sprawność oprawy oświetleniowej ( $\eta_o$ )	89,5%	
Udział strumienia świetlnego emitowanego w dolną półprzestrzeń ( $\Phi_d$ )	100%	
Skuteczność świetlna oprawy oświetleniowej	119 lm/W	
Temperatura barwowa najbliższa ( $T_{cp}$ )	2700 K	
Ogólny wskaźnik oddawania barw ( $R_a$ )	$\geq 80$	

Źródło: opracowanie własne.

Podstawowym parametrem fotometrycznym każdej oprawy oświetleniowej jest strumień świetlny. Podana w tabeli 1 wartość całkowitego strumienia świetlnego odnosi się do matrycy LED. Bezpośrednie nałożenie wtórnego układu optycznego (soczewek) na matrycę LED spowoduje, że część wytworzonego strumienia świetlnego przez gołe, nieosłonięte źródła LED zostanie pochłonięta. Miarą poniesionych strat jest sprawność optyczna oprawy oświetleniowej. Sprawność o wartości 89,5% oznacza, że 10,5% strumienia świetlnego zostanie bezpowrotnie stracona (pochłonięta) przez elementy optyczne oprawy oświetleniowej.

Ogólnie rzecz biorąc, strumień świetlny emitowany przez oprawę oświetleniową można podzielić na dwie składowe. Pierwszą z nich jest strumień świetlny emitowany w dolną półprzestrzeń (w kierunku podłoża). Drugą składową jest strumień świetlny emitowany w górną półprzestrzeń (w kierunku nieboskłonu). Według danych zamieszczonych w specyfikacji, w odniesieniu do obu opraw oświetleniowych (z optyką SP oraz ME), cały strumień świetlny wysyłany jest w dolną półprzestrzeń, co z punktu widzenia ograniczenia wpływu na zanieczyszczenie światłem, jest cechą szczególnie pożądaną.

Parametrem będącym miarą energooszczędności sprzętu oświetleniowego jest skuteczność świetlna. Im wyższa jest jego wartość, tym oprawa oświetleniowa jest bardziej energooszczędna. Skuteczność świetlną oblicza się jako iloraz wysyłanego przez oprawę oświetleniową strumienia świetlnego do pobranej mocy czynnej. Skuteczność świetlna parkowych opraw oświetleniowych wykonanych w technologii LED obecnie przekracza 100 lm/W. Bardzo często w wymaganiach, zawartych w postępowaniu o udzielenie zamówienia publicznego, które prowadzone jest w trybie przetargu nieograniczonego, określa się minimalną wartość skuteczności świetlnej, która zazwyczaj wynosi 110 lm/W.



Barwę światła emitowanego przez lampę określa parametr temperatura barwowa najbliższa. Im temperatura barwowa najbliższa jest niższa, tym barwa jest cieplejsza, przesunięta w stronę czerwieni. Natomiast im temperatura barwowa najbliższa jest wyższa, tym barwa staje się zimniejsza. Wobec faktu, że wraz ze wzrostem temperatury barwowej zwiększa się komponent światła niebieskiego w widmie promieniowania, co wzmacnia wzrost jasności nocnego nieba [18], preferowane są oprawy oświetleniowe o ciepłej barwie światła (najlepiej o wartości temperatury barwowej nieprzekraczającej 3000 K).

Kolejnym parametrem opisującym promieniowanie emitowane przez oprawy oświetleniowe jest ogólny wskaźnik oddawania barw, którego wartość maksymalna wynosi 100. Uznaje się, że im wartość tego parametru jest wyższa, tym wierniej są oddawane barwy oświetlanych przedmiotów. W przypadku oświetlania terenów zielonych wskazane jest, aby wartość tego parametru nie była mniejsza niż 60 [19]. Zastosowane oprawy oświetleniowe charakteryzują się bardzo dobrymi (jak na oświetlenie zewnętrzne) właściwościami oddawania barw.

Bez względu na typ zastosowanego układu optycznego, parametry elektryczne (moc czynna), fotometryczne (strumień świetlny, sprawność oprawy oświetleniowej, skuteczność świetlna) i kolorymetryczne (temperatura barwowa najbliższa, ogólny wskaźnik oddawania barw) opraw oświetleniowych są identyczne. Zastosowanie różnych układów optycznych ma wpływ na sposób dystrybucji światła. Podstawowym sposobem prezentacji rozsyłu światła przez oprawę oświetleniową jest bryła fotometryczna [20]. Jest ona zbiorem przestrzennie rozłożonych wektorów światłości, które mają początek w środku świetlnym oprawy. Bryły fotometryczne opraw oświetleniowych zainstalowanych w parku w Białkowie zamieszczono w formie graficznej w tabeli 2.

Tabela 2. Graficzna ilustracja sposobu dystrybucji światła przez oprawy oświetleniowe z różną optyką wraz z informacją na temat miejsca ich zainstalowania

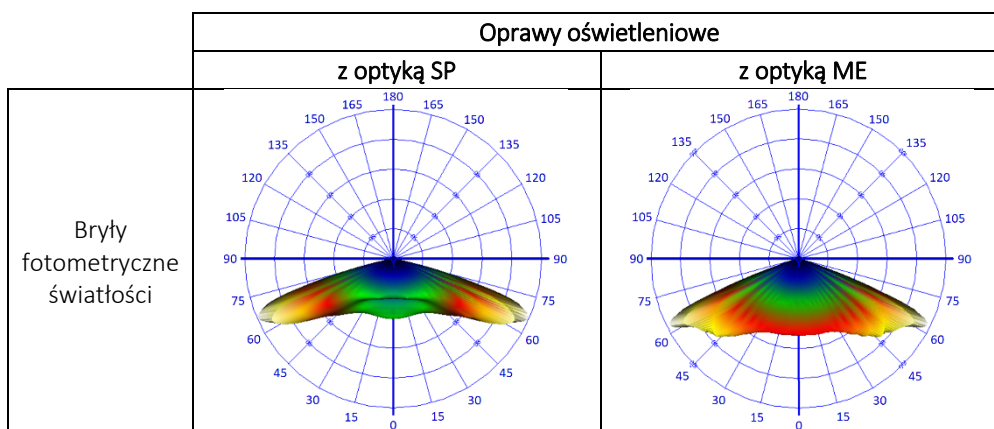
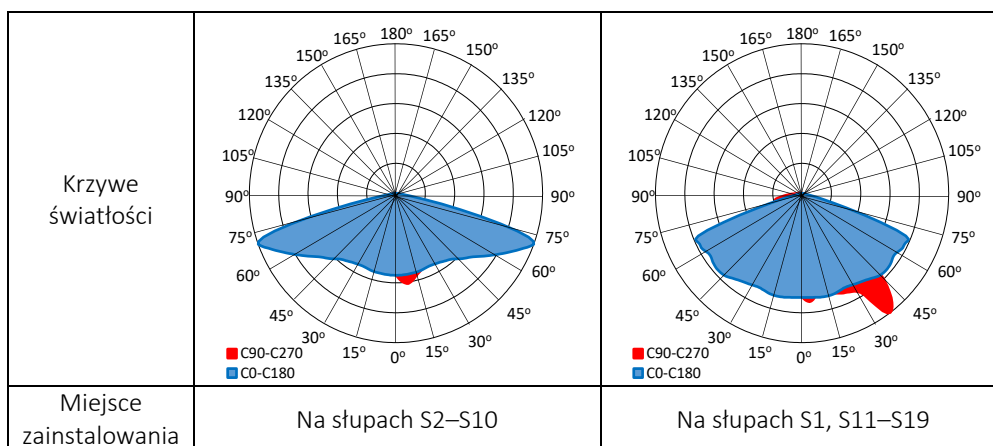


Tabela 2. (cd.)



Źródło: opracowanie własne.

Dodatkowo, poza trójwymiarowym widokiem bryły fotometrycznej zamieszczono na wykresie biegunowym krzywe światłości. Są one śladami przecięcia bryły fotometrycznej wzdłuż dwóch wzajemnie względem siebie prostopadłych płaszczyzn C0–C180 i C90–C270. Taka dodatkowa forma prezentacji sposobu dystrybucji światła, zdaniem autorów, umożliwi lepsze zwizualizowanie kształtu bryły fotometrycznej.

W większości przypadków, na jednym słupie zainstalowano jedną oprawę oświetleniową. Na słupach usytuowanych przed wejściem głównym do pałacu (słupy S12 i S13) zainstalowano po dwie oprawy oświetleniowe. Bliższe informacje na temat sposobu montażu opraw oświetleniowych zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Informacja na temat sposobu oraz liczby zainstalowanych opraw oświetleniowych

	Oprawy oświetleniowe	
	z optyką SP	z optyką ME
Sposób zainstalowania	Bezpośrednio na słupach po jednej oprawie oświetleniowej	Bezpośrednio na słupach po jednej oprawie oświetleniowej w przypadku słupów: S1, S11, S18 i S19 Na wysięgniku o długości 1 m i kącie nachylenia 10° po jednej oprawie oświetleniowej w przypadku słupów: S15–S17 Na wysięgnikach dwuramiennych o długości ramion 0,3 m i kącie nachylenia 10° w przypadku słupów: S12 i S13
Liczba opraw oświetleniowych	9	11

Źródło: opracowanie własne.

### 3.2. Trójwymiarowe modele parku w Białkowie

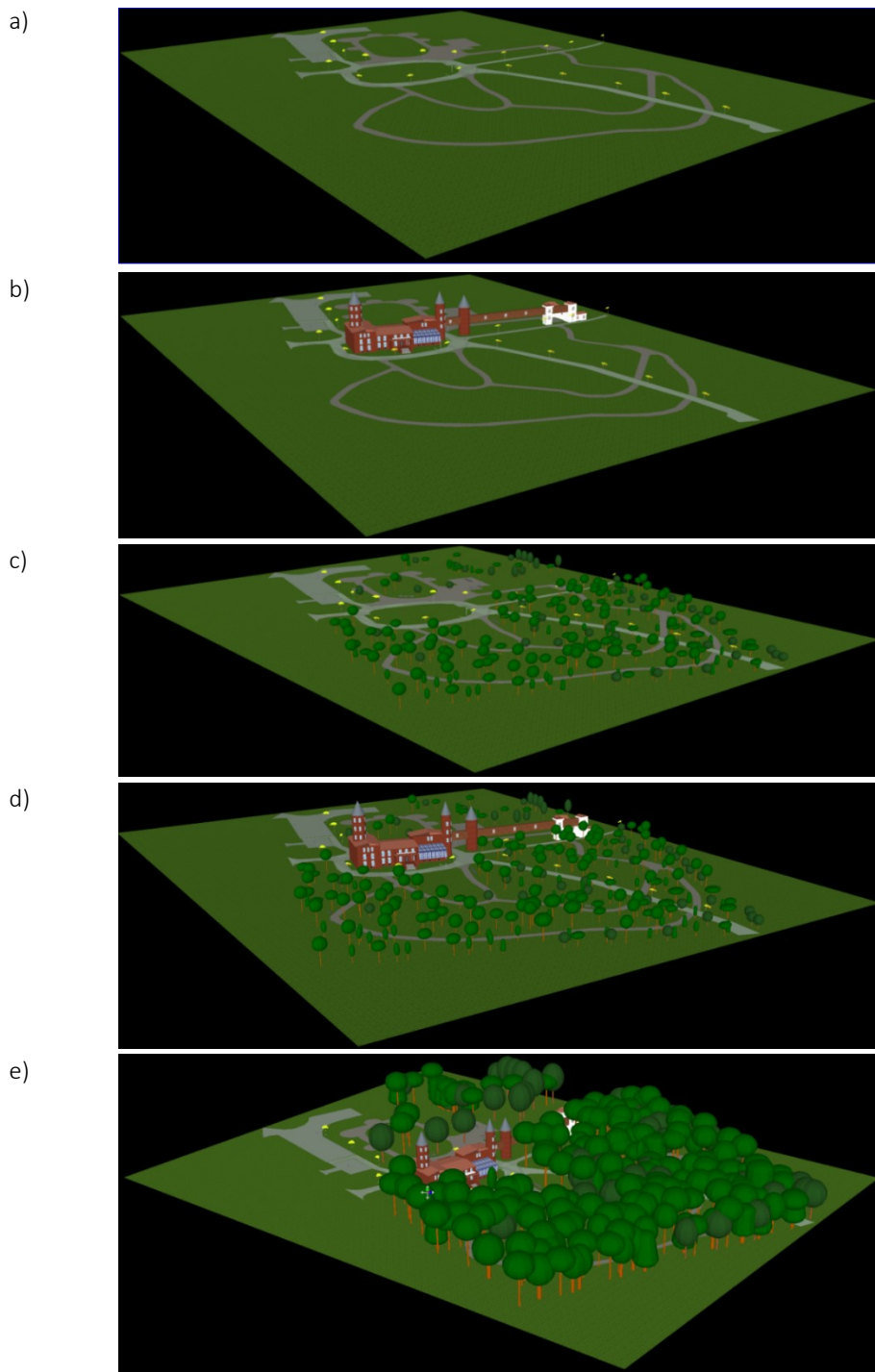
W celu przeanalizowania wpływu instalacji oświetlenia parkowego na emisję strumienia świetlnego w górną półprzestrzeń (w kierunku nieboskłonu), rozważono kilka scenariuszy. Pierwszy z nich (wariant 1) jest odzwierciedleniem pustej przestrzeni parkowej. W wariacie tym nie uwzględniono infrastruktury parku (brak budynków, zieleni, przy alejkach parkowych zamieszczono jedynie latarnie).

W kolejnym scenariuszu (wariant 2) odwzorowano budynki znajdujące się w parku. Należy zaznaczyć, że przygotowanie trójwymiarowych modeli zabudowy jest czasochłonnym zajęciem, dlatego też w procesie projektowania oświetlenia alejek parkowych, projektanci zwykle ograniczają się do rozmieszczenia wyłącznie opraw oświetleniowych. Korzystając z dostępnych w programie komputerowym DIALux brył (takich jak: prostopadłościan, ostrosłup, walec), którym nadano wymagane wymiary, odwzorowano trójwymiarowe modele budynków. W celu nadania poszczególnym obiektom wyglądu zbliżonego do tego w rzeczywistości, na powierzchni brył nałożono tekstury.

W następnym scenariuszu (wariant 3) podjęto próbę uwzględnienia w parku drzew. Dysponując mapą ilustrującą ich rozmieszczenie, poszczególne drzewa usytuowano we wskazanych miejscach. W tym celu skorzystano z gotowych, standardowych trójwymiarowych modeli drzew dostępnych w bibliotece programu komputerowego DIALux. Należy podkreślić, że każdy gatunek drzew ma swoje charakterystyczne, niepowtarzalne cechy, co w praktyce oznacza, iż każda roślina jest inna. Dodatkowo w miarę upływu czasu, wraz ze wzrostem drzew, zmienia się ich wygląd oraz wymiary. Dokładne odwzorowanie trójwymiarowego modelu drzewa jest zatem zadaniem bardzo trudnym i czasochłonnym. Należy mieć także na uwadze fakt, że wraz ze wzrostem detali, przy odwzorowaniu rośliny zwiększa się liczba płaszczyzn, co ma istotne przełożenie na czas trwania obliczeń. Biorąc pod uwagę znaczną liczbę drzew uwzględnioną na mapie parku w Białkowie (240 szt.), zdecydowano się w sposób przybliżony przedstawić drzewa, których korony odwzorowują bryły zamknięte, przypominające kształtem paraboloidę obrotową. Wprowadzając do trójwymiarowego parku zieleni (drzewa) oraz podłoże przyjęto, że trójwymiarowy model parku odpowiada porze letniej, a wysokość obiektów imitujących drzewa nie przekracza 8 m.

Kolejny scenariusz (wariant 4) uwzględnia poza zielenią, budynki znajdujące się w parku. Innymi słowy, rozwiązanie to jest połączeniem wariantów 2 i 3.

Wobec faktu, że roślinność w parku Białkowie jest bujna (drzewa są wysokie, a średnice koron większe niż w domyślnych modelach drzew), zdecydowano się zwiększyć wymiary drzew, co uwzględniono w ostatnim scenariuszu (wariant 5). W ostatnim wariacie przyjęto wysokość drzew od 15 m do 18 m, a średnice koron zwiększono do 8,5 m. Trójwymiarowe modele parku w Białkowie dla pięciu wariantów zamieszczono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Trójwymiarowe modele parku w Białkowie przygotowane programie komputerowym DIALux: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, d) wariant 4, e) wariant 5

*Źródło: opracowanie własne.*

W programie komputerowym DIALux, poszczególnym powierzchniom można przypisać określoną wartość całkowitego współczynnika odbicia. Jest to wielkość, która dostarcza informacji na temat tego, ile procent strumienia świetlnego, padającego na daną powierzchnię, zostanie od niego odbita. Dane na temat przyjętych wartości całkowitego współczynnika odbicia w odniesieniu do poszczególnych powierzchni, zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Przyjęte wartości całkowitego współczynnika odbicia

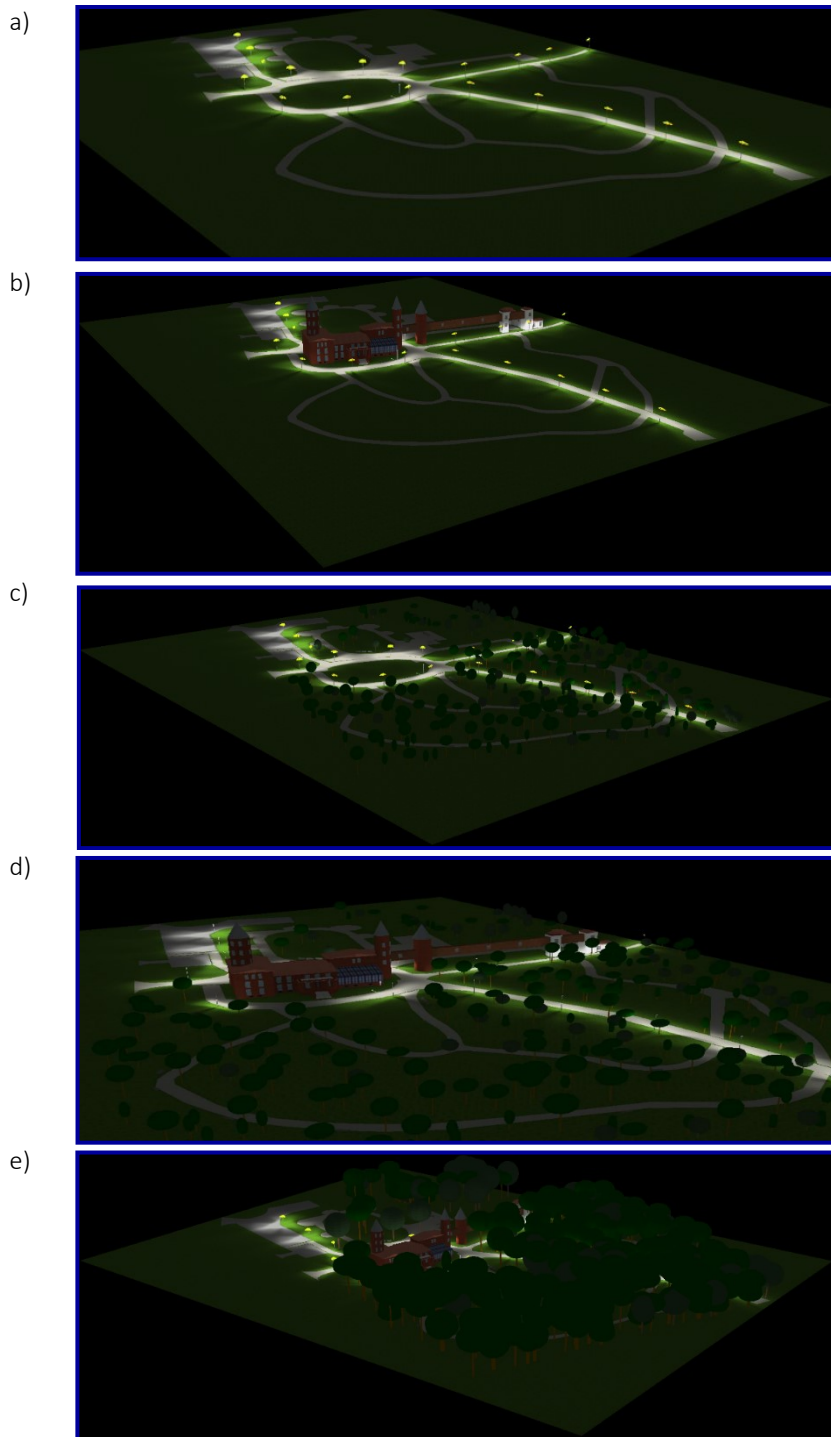
Rodzaj powierzchni	podłoże		drzewo		latarnia	budynek A, B, C	
	trawa	alejka	pień	korona	słup	elewacja	dach
<b>Całkowity współczynnik odbicia</b>	16%	36%	19%	11%	30%	85%	39%
Rodzaj powierzchni	budynek D		wieża bud. D i E		budynek E		
	elewacja	dach	elewacja	dach	elewacja	dach	orangeria
<b>Całkowity współczynnik odbicia</b>	26%	26%	23%	26%	23%	39%	10%

Źródło: opracowanie własne.

## 4. Wizualizacja oświetlenia parku wraz z jego oceną wpływu na zanieczyszczenie światłem

### 4.1. Komputerowe wizualizacje oświetlenia parku w Białkowie

Wizję oświetlanych obiektów oddają trójwymiarowe wizualizacje komputerowe. Korzystając z narzędzi komputerowych istnieje możliwość przedstawienia w sposób plastyczny obrazu oświetlanych obiektów, wraz z oddaniem takich detali, jak gra światła i cienia. Na rysunku 2. zamieszczono wizualizację oświetlenia parku w Białkowie, z uwzględnieniem poszczególnych scenariuszy (wariantów). Zaprezentowane na zdjęciach rezultaty (rys. 4) są efektem przeprowadzonych obliczeń komputerowych.



**Rys. 4.** Oświetlenie parku w Białkowie przygotowane w programie komputerowym DIALux po wykonanych obliczeniach: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, d) wariant 4, e) wariant 5  
*Źródło: opracowanie własne.*

## 4.2. Czas trwania obliczeń symulacyjnych

Czas trwania obliczeń numerycznych uzależniony jest od dwóch czynników. Pierwszym, najistotniejszym według autorów, jest stopień wierności odwzorowania trójwymiarowego parku. Kolejnym są parametry techniczne użytego do obliczeń komputera. Istotnymi elementami komputera, mającymi wpływ na czas trwania obliczeń, są procesor oraz karta graficzna. Obliczenia przeprowadzono równolegle na dwóch komputerach. Pierwszy z nich (komputer 1) wyposażony jest w procesor Intel i7-9750Hf i kartę graficzną NVIDIA 1660 TI 6GB, natomiast drugi (komputer 2) ma zainstalowany procesor Intel E5-1620 i kartę graficzną NVIDIA 1060 3GB. Zarejestrowany czas trwania obliczeń realizowanych przez poszczególne komputery dla pięciu modeli (wariantów) wirtualnego parku zestawiono w tabeli 5. Czas podano w formacie gg:mm:ss (godziny:minuty:sekundy). Wobec faktu, że informacja na temat czasu trwania obliczeń w programie DIALux przestaje być dostępna w chwili ich zakończenia, zaszła potrzeba skorzystania z autorskiego oprogramowania. Narzędzie to umożliwia zapisanie do pliku tekstowego zarejestrowanego czasu trwania procesu obliczeniowego.

Tabela 5. Czas trwania obliczeń w programie komputerowym DIALux

Wariant	Opis	Czas obliczeń [gg:mm:ss]	
		Komputer 1	Komputer 2
1	same alejki parkowe	00:25:36	00:34:08
2	alejki parkowe wraz z budynkami	01:05:59	01:31:45
3	alejki parkowe wraz z drzewami	10:15:20	14:34:08
4	alejki parkowe z budynkami oraz drzewami	10:35:20	14:58:08
5	alejki parkowe z budynkami oraz wysokimi drzewami	11:56:38	15:12:14

Źródło: opracowanie własne.

Należy zauważyć, że wraz ze wzrostem stopnia wierności odwzorowania trójwymiarowego modelu parku (w celu uzyskania większego realizmu), wydłuża się czas trwania obliczeń. W istotny sposób na czas obliczeń wpływ mają trójwymiarowe modele drzew.

## 4.3. Rozkład natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej nad parkiem

Nad wirtualnym modelem trójwymiarowego parku, na wysokości 23 m, równoległe do podłoża, wprowadzono siatkę obliczeniową o wymiarach 400 × 440 m.

Rozmiar siatki obliczeniowej przyjęto eksperymentalnie. Punkty obliczeniowe na siatce rozmieszczono w równych odstępach co 1 m. Dla każdego z tych punktów obliczono w programie komputerowym DIALux natężenie oświetlenia. Rezultaty obliczeń w formie wizualizacji rozkładu natężenia oświetlenia, dla poszczególnych wariantów, zamieszczono na rysunkach 5–9. W celu ułatwienia dokonania analizy uzyskanych danych, na wszystkich rysunkach przyjęto identyczną skalę barwną.

#### 4.4. Wartości strumienia świetlnego emitowane w kierunku nieboskłonu przez oświetlenie parkowe

Znając wymiary siatki obliczeniowej oraz rozkład natężenia oświetlenia na jej powierzchni, obliczono strumień świetlny emitowany w górną półprzestrzeń (w kierunku nieboskłonu)  $\Phi^{\wedge}$ . Rezultaty obliczeń zestawiono w tabeli 6. W celu zwrócenia uwagi na różnice w uzyskanych wynikach obliczeń, w zależności od rozpatrywanego scenariusza wirtualnego parku, obok wartości bezwzględnych, w tej samej tabeli zamieszczono wartości względne. Jako odniesienie przyjęto wariant 1., w którym uwzględniono wyłącznie alejki parkowe.

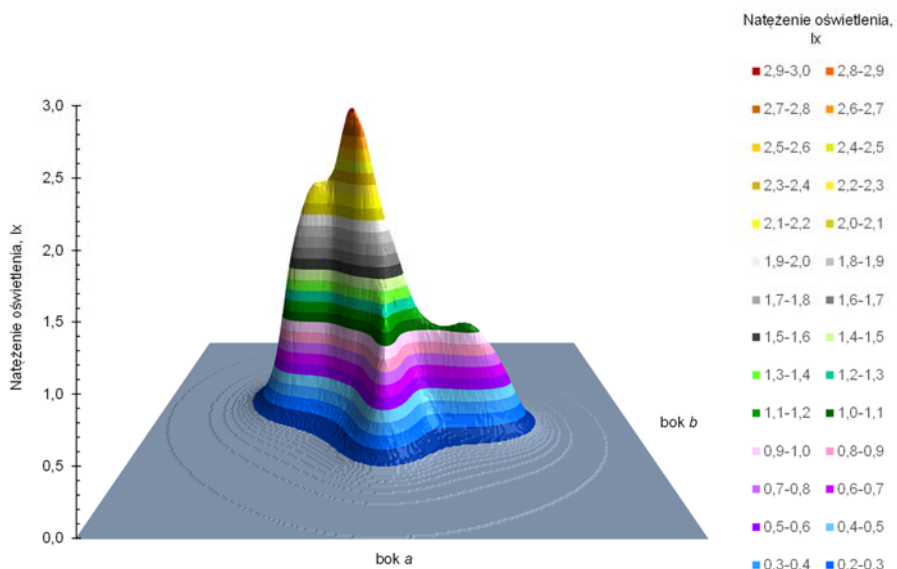
Tabela 6. Obliczone wartości strumienia świetlnego wysłanego w górną półprzestrzeń

Wariant	Opis	Strumień świetlny	
		$\Phi^{\wedge}$ [lm]	$\Phi^{\wedge}$ [%]
1	same alejki parkowe	20445	100,0
2	alejki parkowe wraz z budynkami	22208	108,6
3	alejki parkowe wraz z drzewami	22329	109,2
4	alejki parkowe z budynkami oraz drzewami	20760	101,5
5	alejki parkowe z budynkami oraz wysokimi drzewami	12736	62,3

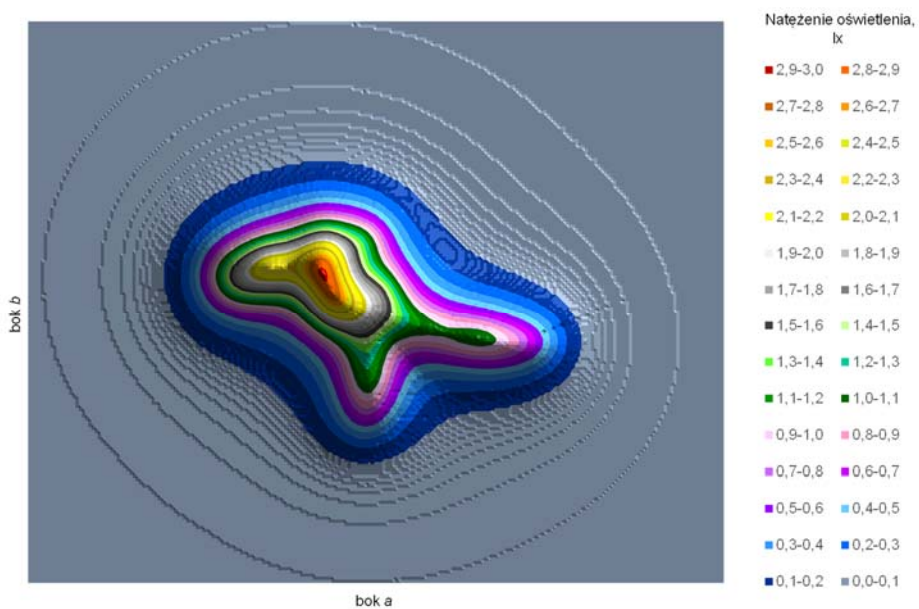
Źródło: opracowanie własne.



a)



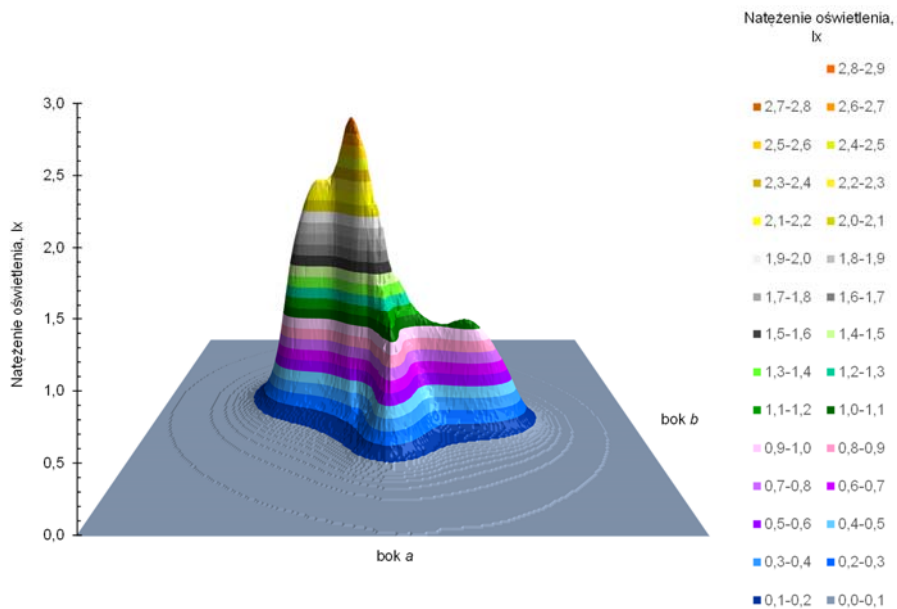
b)



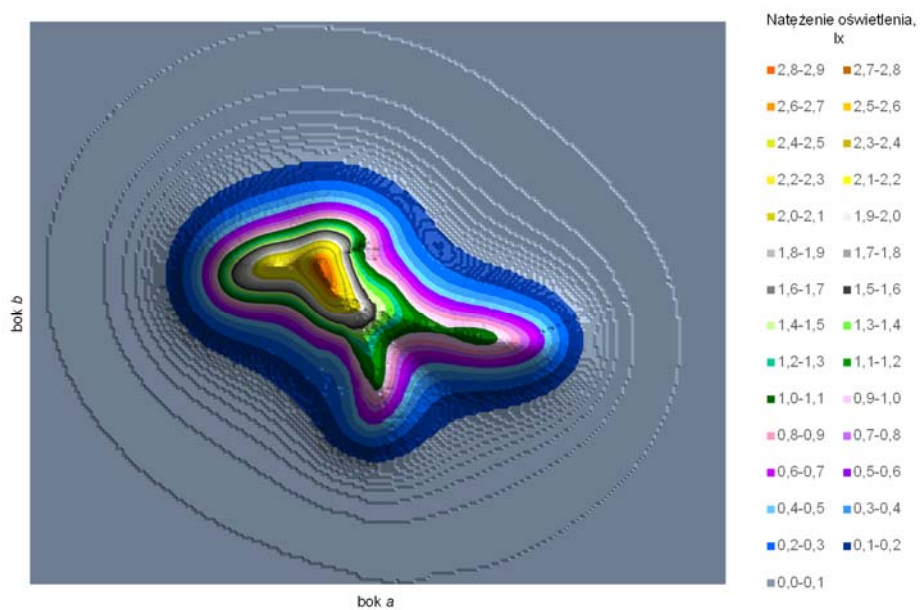
Rys. 5. Rozkład natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej nad parkiem dla wariantu 1:  
a) widok 3D, b) widok 2D

Źródło: opracowanie własne.

a)



b)

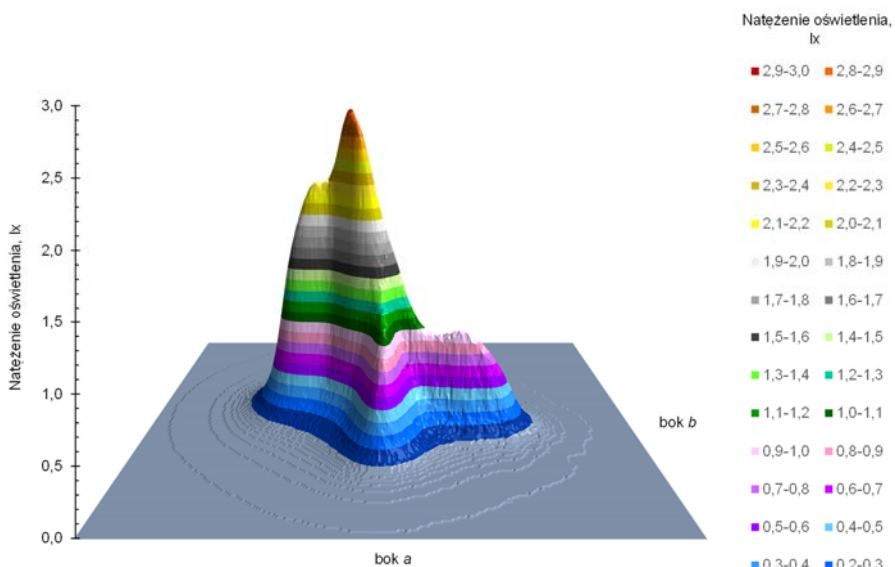


Rys. 6. Rozkład natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej nad parkiem dla wariantu 2:

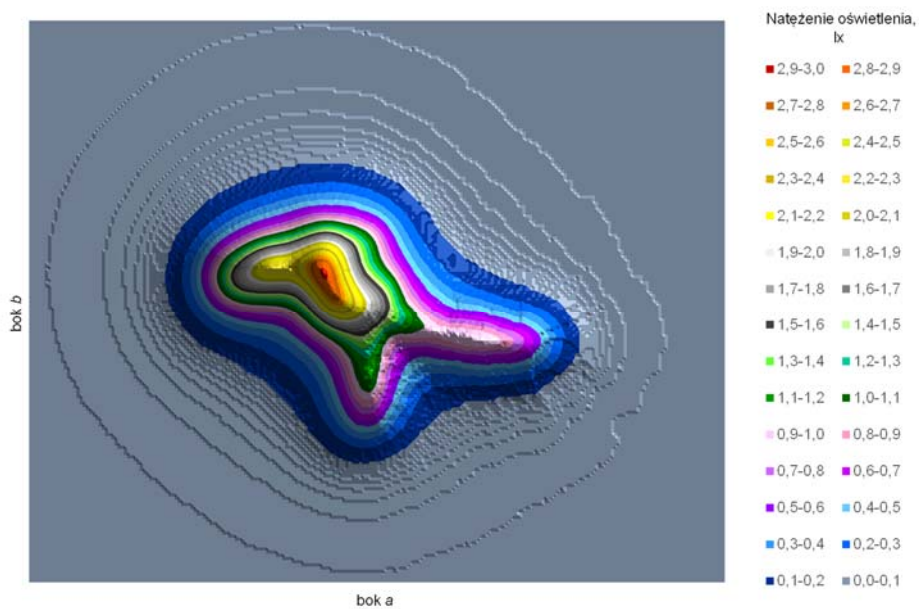
a) widok 3D, b) widok 2D

Źródło: opracowanie własne.

a)



b)

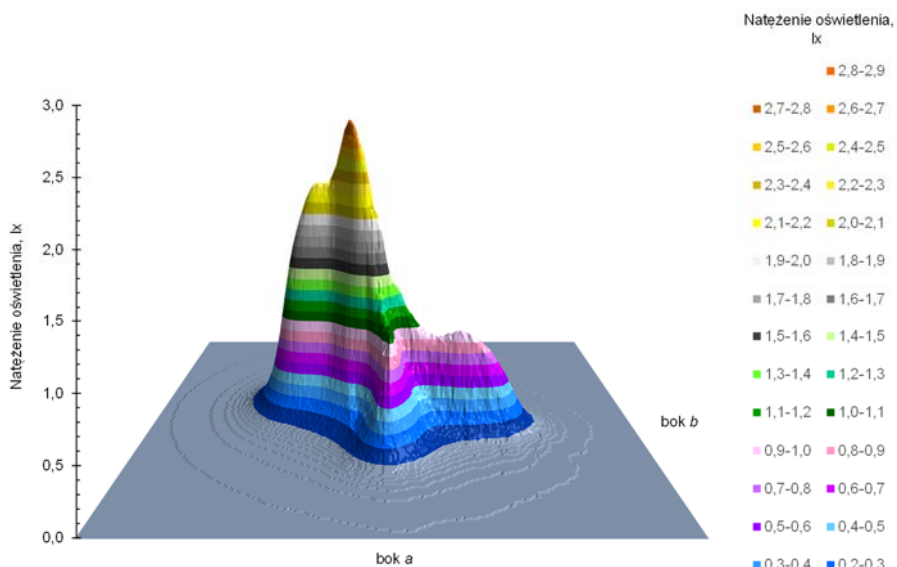


Rys. 7. Rozkład natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej nad parkiem dla wariantu 3:

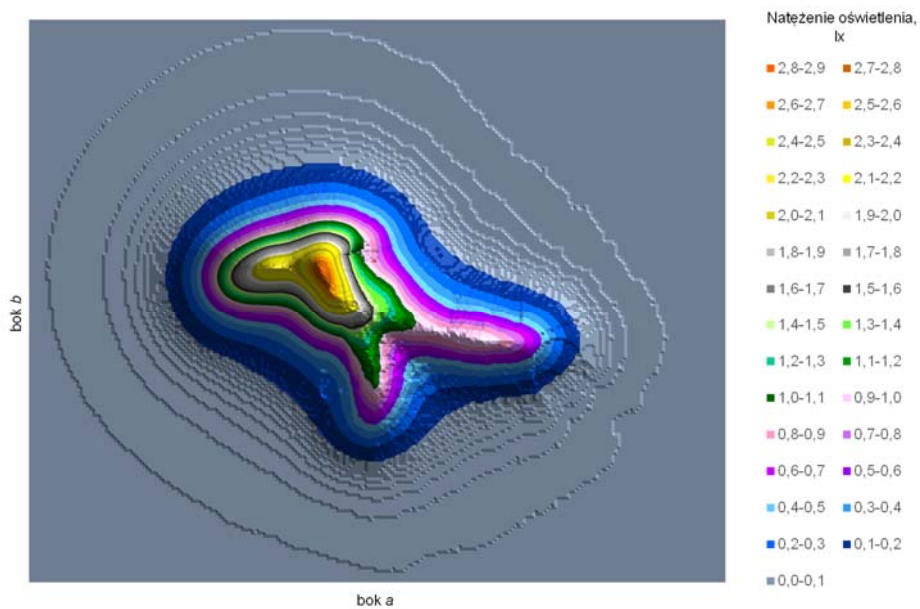
a) widok 3D, b) widok 2D

Źródło: opracowanie własne.

a)



b)

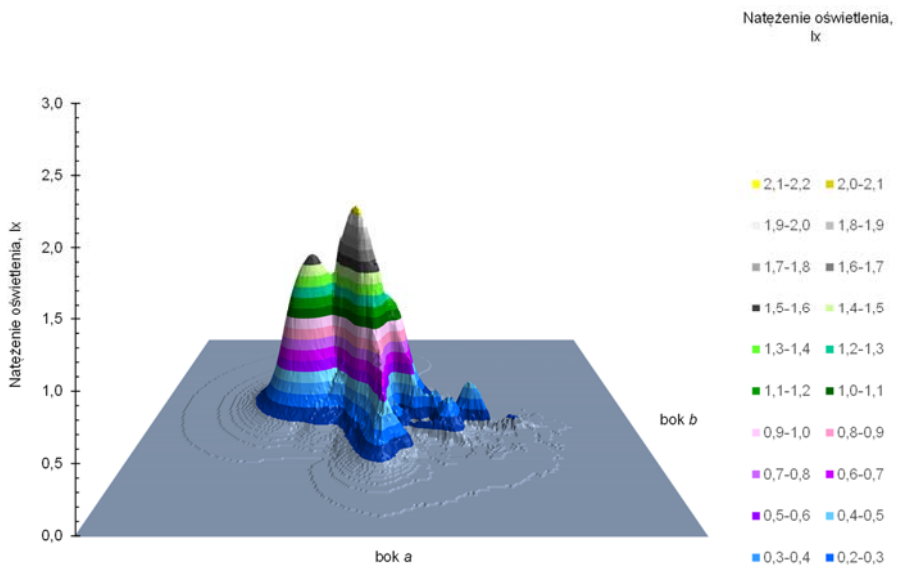


Rys. 8. Rozkład natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej nad parkiem dla wariantu 4:

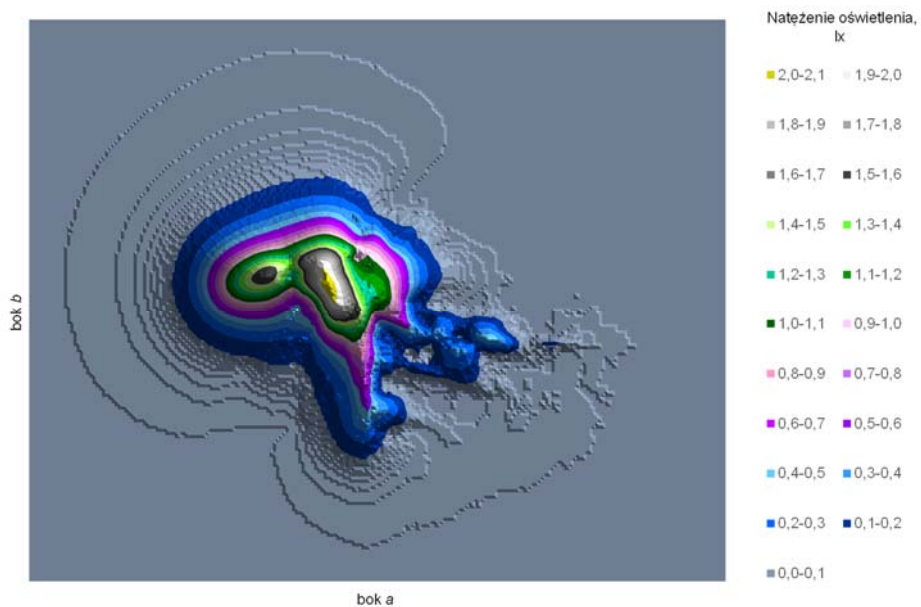
a) widok 3D, b) widok 2D

Źródło: opracowanie własne.

a)



b)



Rys. 9. Rozkład natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej nad parkiem dla wariantu 5:

a) widok 3D, b) widok 2D

Źródło: opracowanie własne.

#### 4.5. Zalecane oraz obliczone wartości natężenia oświetlenia na alejkach parkowych

Wobec faktu, że głównym zadaniem opraw oświetleniowych jest oświetlenie podłoża, w pracy zwrócono także uwagę na uzyskane parametry oświetleniowe alejek parkowych. Odwzorowując projekt oświetlenia alejek parkowych, uzyskane wyniki obliczeń odniesiono do wytycznych ujętych w normie europejskiej [21]. W przytoczonej normie podano zalecane wartości natężenia oświetlenia dla klas oświetleniowych P, które mają zastosowanie w przypadku pieszych i rowerzystów poruszających się po chodnikach (tabela 7). Wybór klasy oświetleniowej (od P1 do P6) uzależniony jest od takich czynników, jak: prędkość poruszania się, natężenie ruchu, rodzaj ruchu (piesi, rowerzyści, ruch zmotoryzowany), zaparkowane pojazdy, luminancja otoczenia. Im wyższa klasa oświetleniowa, tym wyższe są wymagania oświetleniowe. Na przykład, w przypadku klasy oświetleniowej P1 średnia wartość natężenia oświetlenia na alejce parkowej ( $E_{sr}$ ) nie powinna być mniejsza od 15 lx, natomiast wartość minimalna ( $E_{min}$ ) powinna wynosić co najmniej 3 lx.

Tabela 7. Zalecane wartości natężenia oświetlenia dla klas oświetleniowych P

Klasa oświetleniowa	Poziome natężenie oświetlenia	
	$E_{sr}$ [lx]	$E_{min}$ [lx]
P1	15,0	3,0
P2	10,0	2,0
P3	7,5	1,5
P4	5,0	1,0
P5	3,0	0,6
P6	2,0	0,4

Źródło: opracowanie własne, na podstawie [21].

Z uwagi na bardzo niską prędkość poruszania się pieszych, bardzo niskie natężenie ruchu, brak zaparkowanych pojazdów oraz niską luminancję otoczenia, alejki parkowe w Białkowie można zaszeregować do klasy oświetleniowej P6. Obliczone wartości natężenia oświetlenia dla poszczególnych alejek parkowych (z uwzględnieniem pięciu scenariuszy z tabeli 6) zestawiono w tabeli 8. Wszystkie obliczenia przeprowadzono przy współczynniku utrzymania równym 1 (co odpowiada początkowemu poziomowi natężenia oświetlenia, z uwagi na fakt, że instalacja oświetleniowa jest nowa). Punkty, w których wykonano obliczenia natężenia oświetlenia zamieszczono bezpośrednio na powierzchni alejek parkowych w odstępach co 1 m.

Tabela 8. Obliczone wartości natężenia oświetlenia na alejkach parkowych

Wariant	Poziome natężenie oświetlenia oraz klasa oświetleniowa	Alejka 1	Alejka 2	Alejka 3
1	$E_{\text{śr}}$ [lx]	25	28	20
	$E_{\text{min}}$ [lx]	0,56	8,24	4,15
	Klasa	P6	P1	P1
2	$E_{\text{śr}}$ [lx]	19	29	18
	$E_{\text{min}}$ [lx]	0,49	8,30	4,75
	Klasa	P6	P1	P1
3	$E_{\text{śr}}$ [lx]	18	22	15
	$E_{\text{min}}$ [lx]	0,42	6,35	2,99
	Klasa	P6	P1	P2
4	$E_{\text{śr}}$ [lx]	17	22	14
	$E_{\text{min}}$ [lx]	0,41	6,44	0,89
	Klasa	P6	P1	P5
5	$E_{\text{śr}}$ [lx]	15	15	8,5
	$E_{\text{min}}$ [lx]	0,40	1,12	0,64
	Klasa	P6	P4	P5

Analizując dane zamieszczone w tabeli 8 można dostrzec (w zestawieniu z zaleceniami z tabeli 7) od kilku do kilkunastokrotnie razy większe wartości średniego natężenia oświetlenia. Tak duże różnice świadczą o przewymiarowaniu oświetlenia alejek parkowych. Największe wartości natężenia oświetlenia uzyskano w przypadku alejki nr 2. Z uwagi na prowadzone obserwacje w Obserwatorium Astronomicznym w Białkowie, projektanci instalacji oświetleniowej przewidzieli możliwość wyłączenia wszystkich opraw oświetleniowych na terenie parku. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne podczas wykonywanych prac badawczych.

Zamieszczone w tabeli 8 wyniki dotyczą nowych opraw oświetleniowych. Warto zauważyć, że w miarę upływu czasu strumień świetlny emitowany przez poszczególne oprawy oświetleniowe będzie malał. Powodem tego stanu rzeczy jest m.in. starzenie się elementów opraw oświetleniowych, co jest zjawiskiem naturalnym i nieodwracalnym. Problematyka wyznaczenia współczynnika utrzymania w odniesieniu do projektowania zewnętrznych instalacji oświetleniowych jest złożona i wykracza poza zakres tematyczny niniejszej pracy. Zasady wyznaczenia współczynnika utrzymania ujęto w raporcie technicznym CIE 154:2003 [22].

## 5. Podsumowanie

Proces tworzenia trójwymiarowego modelu parku wraz z pełnym zagospodarowaniem (budynki, drzewa) jest bardzo żmudnym zadaniem. Z tego też powodu podczas projektowania oświetlenia alejek parkowych, projektanci ograniczają się zwykle do rozmieszczenia latarni, bez uwzględniania budynków, drzew itp. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można jednoznacznie stwierdzić, że stopień wierności odwzorowania modelu geometrycznego parku ma wpływ na wartość strumienia świetlnego emitowanego w kierunku nieboskłonu.

Istotny wpływ na ograniczenie emisji strumienia świetlnego w górną półprzestrzeń mają wysokie drzewa. Strumień świetlny odbity od podłoża oraz innych obiektów jest pochłaniany przez korony drzew, które pełnią swego rodzaju rolę naturalnego ekranu (przeszkody) ograniczającego emisję światła w kierunku nieba. Inaczej sytuacja przedstawia się, gdy drzewa są niskie. Znajdujące się w pobliżu latarni korony drzew, pełnią funkcję wtórnego układu optycznego, od którego odbija się światło emitowane przez oprawy oświetleniowe. Niskie drzewa będą zatem wzmaczać efekt zanieczyszczenia światłem.

W trójwymiarowym modelu parku zastosowano oprawy oświetleniowe emitujące strumień świetlny wyłącznie w dolną półprzestrzeń, co niewątpliwie z punktu widzenia ograniczenia zanieczyszczenia światłem jest pożądane. Nie oznacza to jednak, że światło nie będzie kierowane w górną półprzestrzeń, jest to bowiem zjawisko, którego nie da się zupełnie wyeliminować.

## Literatura

- [1] *Lighting Use & Design*, Project for Public Spaces  
<https://www.pps.org/article/streetlights> (dostęp: 17.12.2021).
- [2] Zhang, R., Piao, Y.-J., Cao, L.-S., Cho, T.-D. *The Research on Lighting Design of Parks* Journal of Environmental Science International, 2014, 23, s. 1013–1020, DOI: 10.5322/JESI.2014.23.6.1013.
- [3] Halefoglu L., Jiang, X., Kendrick A.J., Saunders, G.D., Sciarrino, M., Vizner, G., Bailey R., *Smart lighting: Developing a smarter control mechanism for park trail lighting* [w:] *Proceedings of the 2016 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, Charlottesville, VA, USA, 2016, s. 277–282.
- [4] Tabrizian P., Baran P.K., Smith W.R., Meentemeyer R.K., *Exploring perceived restoration potential of urban green enclosure through immersive virtual environments*, Journal of Environmental Psychology, 2018, 55, s. 99–109, DOI: 10.1016/j.jenvp.2018.01.001.
- [5] Narisada, K., Schreuder D., *Light pollution and astronomy* [w:] *Galactic Bulges*, Vol. 322, Springer, Dordrecht, 2004, s. 115–138.
- [6] Jechow A., Ribas S.J., Canal-Domingo R., Holker F., Kolláth Z., Kyba C.C.M., *Tracking the dynamics of skyglow with differential photometry using a digital camera with fisheye lens*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 209, s. 212–223, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.01.032.



- [7] Kołomański S., Wiernasz A., Borodacz K., Białek R., Mikołajczyk P., *ALPS – stacje obserwacyjne zanieczyszczenia światłem* [w:] *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, A. Kotarba (red.), Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 2019, s. 153–166.
- [8] Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [9] Ścieżor T., *The impact of clouds on the brightness of the night sky*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2020, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106962.
- [10] Tabaka P., *Pilot Measurement of Illuminance in the Context of Light Pollution Performed with an Unmanned Aerial Vehicle*, Remote Sensing, 2020, 12(13), DOI: 10.3390/rs12132124.
- [11] Li X., Levin N., Xie J., Li D., *Monitoring hourly night-time light by an unmanned aerial vehicle and its implications to satellite remote sensing*, Remote Sensing of Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111942.
- [12] Rabaza O., Gómez-Lorente D., Pérez-Ocón P., Peña-García A., *A simple and accurate model for the design of public lighting with energy efficiency functions based on regression analysis*, Energy, 2016, s. 831–842, DOI: 10.1016/j.energy.2016.04.078.
- [13] Relux Desktop – the new free approach to planning, <https://relux.com/de/relux-desktop.html> (dostęp: 10.06.2021).
- [14] DIALux and product catalogues, <https://www.dialux.com/en-GB/download> (dostęp: 10.06.2021).
- [15] Calculux 7.7, <https://calculux.software.informer.com/> (dostęp: 10.06.2021).
- [16] Obserwatorium w Białkowie, Uniwersytet Wrocławski, <https://uni.wroc.pl/obserwatorium-w-bialkowie/> (dostęp: 08.12.2021).
- [17] Torge R. *Leo Wutschowsky i jego obserwatorium astronomiczne w Białkowie – uwagi biograficzne*, Kwartalnik Historii Nauki i Techniki, 2006, 51/2, s. 203–209
- [18] Luginbuhl C.B., Boley P.A., Davis D.R., *The impact of light source spectral power distribution on sky glow*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, s. 21–26, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.004.
- [19] Tabaka P., Rózga P., *Influence of a Light Source Installed in a Luminaire of Opal Sphere Type on the Effect of Light Pollution*, Energies, 2020, 13(2), DOI: 10.3390/en13020306.
- [20] PN-EN 13032-1+A1:2012 Światło i oświetlenie – Pomiar i prezentacja danych fotometrycznych lamp i opraw oświetleniowych – Część 1: Pomiar i format pliku.
- [21] PN-EN 13201-2:2016-03 Oświetlenie dróg Część 2: Wymagania eksploatacyjne.
- [22] CIE 154:2003 Technical Report. The maintenance of outdoor lighting systems.

## A CASE STUDY OF THE EFFECT OF PARK LIGHTING ON LIGHT POLLUTION USING COMPUTER SIMULATION

**Abstract:** The study presents the results of simulation calculations illustrating the impact of park lighting on the emission of the luminous flux into the upper half-space. Using the computer program DIALux 4.13. a three-dimensional model of the park in Białków was developed. In addition to the distribution of park alleys with lanterns, the considerations also include scenarios in which the impact of buildings and vegetation on the value of the luminous flux sent towards the sky. Based on the calculations, there are significant changes in the lighting intensity on the computing grid depending on the modeling of the park's infrastructure. The calculations were carried out in parallel on two computers with different computing powers. The obtained results of the calculations show that, apart from the computing power of the computer, the duration of the calculations is also significantly influenced by the inclusion of the vegetation park in the model.

**Keywords:** lighting design, light fixture, light pollution, park, astronomical observatory



# WERTYKALNA ZMIENNOŚĆ JASNOŚCI NOCNEGO NIEBA W TERENIE ZURBANIZOWANYM

**Dominika Karpińska**

Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej,  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
*karpinskadominika@doktorant.umk.pl*

**Mieczysław Kunz**

Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej,  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
*met@umk.pl*

**Streszczenie:** Nadmierna ilość sztucznego światła emitowana w nocy do dolnej warstwy atmosfery stała się już codziennością krajobrazu współczesnego miasta oraz stopniowo staje się także zjawiskiem towarzyszącym obszarom położonym poza większymi skupiskami ludzkimi. Miejskie wyspy świetlne są obiektami ukierunkowanych badań prowadzonych od kilkadziesiąt lat przez naukowców reprezentujących różne specjalności.

W Toruniu od kilku lat prowadzone są systematyczne badania nad zjawiskiem smogu świetlnego. Powtarzalnemu pomiarowi poddana została jasność nocnego nieba w kilkadziesiąt punktach kontrolnych, rozmieszczonych na terenie całego miasta. Kolejnym etapem badań jest pomiar zmienności jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym. W tym celu w dwóch punktach miasta wykonywano powtarzalne pomiary na zadanych wysokościach z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego, na pokładzie którego zamontowano automatyczny miernik światła własnej konstrukcji.

Uzyskane w ten sposób wyniki jasności nocnego nieba pozwoliły na określenie jej zmienności w gradiencie pionowym do wysokości 120 metrów od powierzchni gruntu, a także na przetestowanie możliwości wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych w ukierunkowanych badaniach zanieczyszczenia świetlnego.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, BSP, pomiar wertykalny, gradient pionowy, teren zurbanizowany

## 1. Wstęp

Człowiek, przez swoje wszystkie działania ustawicznie wpływa na przekształcanie środowiska, w którym żyje i funkcjonuje. Dotyczy to zarówno jego najbliższego otoczenia, jak i coraz bardziej odległych obszarów. Przekształcenia te odbywają się zazwyczaj w gradiencie poziomym, z najsilniejszym wpływem w bezpośrednim otoczeniu działania czynnika i z reguły słabnącym w miarę oddalania się od punktu oddziaływania. Oddziaływanie to może następować także w gradiencie pionowym – wertykalnym w górę, ale kierunek ten jest rzadko uwzględniany w analizach i poddawany bardziej szczegółowym badaniom.

Wpływając na bezpośrednio otaczający człowieka krajobraz, dokonujemy modyfikacji wybranych parametrów jego stanu środowiska na coraz bardziej rozległych obszarach i skalach przestrzennych. Niestety, nieodłącznym elementem towarzyszącym postępującej urbanizacji jest występowanie różnych rodzajów zanieczyszczeń i zmienności ich koncentracji. Wśród nich znajdują się zarówno zanieczyszczenia dotyczące wód powierzchniowych i podziemnych, gleby czy powietrza różnymi substancjami – pyłami, metalami ciężkimi oraz skażeniami promieniotwórczymi [1, 2, 3, 4, 5].

Jednym z nich, wcześniej nie branym pod uwagę, jest dzisiaj coraz bardziej widoczne zanieczyszczenie nieba sztucznym światłem [6, 7]. Zjawisko to definiuje się jako emisja nadmiernej ilości światła uwalniana do dolnej warstwy atmosfery, która powoduje odczuwalne i długoterminowe negatywne konsekwencje zarówno dla zwierząt i roślin, wpływając na ich rozwój, funkcjonowanie i bieżące zachowanie, jak i przede wszystkim, na jakość, zdrowie i życie człowieka [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Zjawisko to rozpowszechnione jest w skupiskach ludzkich oraz w ich otoczeniu. Łuna świetlna towarzysząca w szczególności miastom rozlewa się jeszcze kilkanaście kilometrów poza jego obszarem [15, 16]. Widać ją doskonale oddalając się od miasta, a jej oddziaływanie nie jest odczuwalne i widoczne wyłącznie w gradiencie poziomym – horyzontalnym, ale także pionowym – wertykalnym.

W celu zrozumienia negatywnego wpływu zjawiska na życie i funkcjonowanie organizmów żywych w bezpośrednim i dalszym otoczeniu konieczne są nie tylko wielowątkowe badania, ale także ukierunkowany monitoring, pokazujący zmienność całego procesu w dłuższym horyzoncie czasowym. Pomiary zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem należą do powyżej wymienionej kategorii zjawisk, które z różną intensywnością i różnymi wykorzystanymi metodami prowadzone są już od kilkudziesięciu lat. Badania współcześnie realizowane stają się coraz bardziej kompleksowe, angażujące badaczy z różnych dziedzin naukowych, przez co zjawisko to staje się coraz lepiej wyjaśniane i przez to rozumiane. W kilku jednostkach naukowych, zarówno polskich, jak i zagranicznych, prowadzi się badania mające na celu dogłębne poznanie zjawiska smogu świetlnego w różnych aspektach i uwarunkowaniach występowania [7, 15, 16, 17, 18, 19].

W Toruniu od 2017 roku prowadzony jest ukierunkowany monitoring zanieczyszczenia światłem. Początkowo realizowany był w ramach 24 stacji pomiarowych rozmieszczonych na całym obszarze miasta w otoczeniu różnych form pokrycia/użytkowania terenu, na których dokonywano systematycznego pomiaru jasności nocnego nieba z wykorzystaniem fotometru SQM (ang. *Sky Quality Meters*) kanadyjskiej firmy Unihedron [19, 20]. Od 2020 roku realizowany jest w pełni automatyczny monitoring zjawiska na 19 stanowiskach pomiarowych, których liczba systematycznie rośnie, aby osiągnąć w końcu 2022 roku około 40 lokacji, tworząc docelowo zintegrowany system rejestrujący ze zdalną transmisją danych. Głównym elementem tego systemu jest autorskiej konstrukcji kompaktowe urządzenie mierzące jasność nocnego nieba [21, 22, 23], które w założeniu realizuje pomiar w określonych interwałach czasowych, ale po modyfikacji kodu programu i sposobu montażu może zostać wykorzystane na platformach przenośnych, np. bezzałogowych statkach powietrznych (BSP).

W celu poznania prawidłowości w zmienności zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba oraz uzupełnienia wcześniej prowadzonych badań zrealizowano wertykalny pomiar zjawiska w dolnej części troposfery, do wysokości 120 metrów. Było to możliwe poprzez wykorzystanie w akwizycji danych bezzałogowego statku powietrznego oraz skonstruowanego fotometru podłączonego do bezprzewodowej sieci przesyłowej, dzięki której możliwy był odczyt wartości w czasie rzeczywistym na ustalonych wysokościach nad poziomem gruntu.

Badania naukowe w środowisku geograficznym, realizowane z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych stają się coraz bardziej powszechne. Ta intensywnie rozwijana technologia doskonale uzupełnia lukę pułapową pomiędzy naziemną eksploracją terenową a rejestracją lotniczą oraz satelitarną [24].

## 2. Pomiar jasności nocnego nieba

Zanieczyszczenie światłem można określać na kilka sposobów, różniących się metodyką postępowania oraz stopniem zaawansowania urządzeń i technologii pomiarowych. Wyróżnia się zarówno metody przeznaczone dla wyspecjalizowanych grup badawczych – profesjonalistów, jak i dla amatorów – hobbystów zainteresowanych głównie obserwacją nocnego nieboskłonu z astronomicznego punktu widzenia. Do wykorzystywanych sposobów pomiaru należą m.in. metody obserwacyjne, w których stopień zanieczyszczenia światłem określa się na podstawie ustalenia liczby gwiazd w danym obszarze czy jasności komet; metody instrumentalne, zakładające wykorzystanie sprzętu pomiarowego oraz metody stosujące liczne algorytmy do obliczenia przewidywanej jasności nieba, uwzględniając kilka dodatkowych uwarunkowań i czynników [25, 26, 27].

## 2.1. Najczęściej stosowane metody pomiarowe jasności nocnego nieba

Najbardziej powszechną metodą pomiarową wykorzystywaną przez specjalistów zajmujących się tematyką zanieczyszczenia światłem jest pomiar za pomocą fotometru SQM [7, 17, 18, 28, 29, 30]. Urządzenia dokonują pomiaru jasności powierzchniowej nieba, która wyrażona jest w jednostce magnitudo na sekundę kątową do kwadratu ( $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ ), powszechnie stosowaną w astronomii. Fotometry występują w kilku wersjach i rozszerzeniach, które różnią się parametrami technicznymi, głównie trybem realizacji pomiarów i sposobem zapisu danych. Dzięki powszechności tego rozwiązania możliwe jest porównanie zebranych danych z wynikami pozyskanymi w innych częściach globu. Regularne pomiary fotometrem SQM są prowadzone w kilku miejscach w Polsce, głównie przez przedstawicieli ośrodków naukowych [17, 18, 19].

Inną szeroko wykorzystywaną metodą określenia stopnia zanieczyszczenia światłem nocnego nieba jest analiza cyfrowych zdjęć nieboskłonu wykonanego aparatem fotograficznym, za pomocą specjalistycznych narzędzi [7, 18, 31]. Najbardziej powszechne jest tu zastosowanie obiektywu typu „rybie oko”, który umożliwia analizę całego nieba przy zenitalnym skierowaniu kamery.

Obserwację światła emitowanego z Ziemi można także przeprowadzić, analizując zobrazowania satelitarne wykonane przez satelity obserwacyjne, takie jak DMSP, Suomi–NPP czy Luojia 1–01 z przystosowanymi sensorami [32, 33, 34, 35]. Dane pozyskane z wymienionych satelitów różnią się między sobą m.in. w zakresie rozdzielczości przestrzennej, która wynosi odpowiednio 3 km dla zobrazowań DMSP, 1 km dla Suomi–NPP, oraz 130 m dla obrazów Luojia.

Każda z wymienionych powyżej metod ma swoje zalety stosowania i ograniczenia korzystania w określonych warunkach operacyjnych, a uzyskanych wartości nie można wprost i bezkrytycznie porównywać. Aby wyniki zrealizowanych pomiarów, przy zastosowaniu całego dostępnego spektrum metod akwizycyjnych były komplementarne, pozyskane surowe dane należy przetworzyć i sprowadzić do porównywalnej jednostki.

## 2.2. Autorskie urządzenie do pomiaru jasności nocnego nieba

W 2019 roku rozpoczęto prace koncepcyjne, organizacyjne i technologiczne służące utworzeniu systemu monitoringu zanieczyszczenia światłem, obejmującego docelowo cały obszar miasta Torunia i działającego w oparciu o rozproszoną chmurę urządzeń pomiarowych. W założonej bezprzewodowej sieci LoRaWAN [21, 22, 23] wykorzystane zostało własnej konstrukcji urządzenie pomiarowe (rys. 1).



**Rys. 1.** Automacyjne urządzenie pomiarowe własnej konstrukcji

Źródło: fot. Dominika Karpińska.

Sieć LoRaWAN jest jedną z bezprzewodowych sieci dalekiego zasięgu pracujących w trybie obniżonego poboru mocy [36, 37, 38]. Jest jednym z rozwiązań wykorzystywanych do komunikacji urządzeń Internetu Rzeczy (IoT, ang. *Internet of Things*), a także elementem rewolucji przemysłowej 4.0 (ang. *Industry 4.0*) wspomagającym ideę *Smart Cities* w obszarze *Smart Environment*. Technologia ta wykorzystywana jest w wielu dziedzinach, nie tylko w zakresie nowoczesnych rozwiązań logistycznych, drogowych czy środowiskowych, ale coraz powszechniej także do zarządzania dużymi jednostkami osadniczymi – miastami i aglomeracjami. W standardzie LoRaWAN elementem komunikacji bezprzewodowej jest LoRa (ang. *Long Range*) [38]. Jest ona uzupełnieniem istniejącej niszy, pomiędzy ogólnodostępnymi technologiami, takimi jak Wi-Fi, Bluetooth oraz LTE i wyróżnia się w zakresie zarówno możliwych odległości przesyłania danych, jak i wysokiej energooszczędności w swoim działaniu.

Autorskie, automatyczne urządzenie do pomiaru zanieczyszczenia światłem składa się z trzech głównych elementów: płytki rozwojowej z czujnikami środowiskowymi, płytki deweloperskiej z modułem komunikacyjnym oraz czujnika światła. Elementy elektroniczne umieszczono w szczelnej obudowie odpornej na warunki atmosferyczne, w której na górnym boku wykonano otwór pozwalający na realizację pomiaru przez czujnik światła.

Jedną z najważniejszych użytkowych cech urządzenia jest zdalny pomiar jasności nieba oraz innych wybranych parametrów środowiskowych, jak temperatura czy wilgotność. Dzięki wybranej technologii transmisji, dane w terenie zabudowanym przesyłane są do bramy dostępowej (ang. *gateway*), nawet na odległość do 4 km, a w obszarach otwartych, pozbawionych przeszkód (budynki, roślinność wysoka, deniwelacje terenu) jeszcze dalej. Praca urządzenia odbywa się w obniżonym trybie



poboru energii, przez co realizowany proces monitoringu zjawiska (w tym wypadku smogu świetlnego) jest energooszczędny, co objawia się długotrwałym działaniem na jednym zestawie zasilania. Zgodnie z założeniami projektowymi urządzenie pracuje cyklicznie, wybudza się w czasie trwania nocnej sesji pomiarowej, dokonuje odczytu, co ustalony 15-minutowy interwał, przesyła dane, a po zakończonej sesji usypia się na okres do kolejnego wybudzenia następnego dnia (tabela 1).

Tabela 1. Zestawienie parametrów skonstruowanego urządzenia

Parametr	Wartość
waga	380 g
wymiar	5,5 x 8,2 x 15,8 cm
standard przesyłania danych	LoRaWAN
pasma częstotliwości	868 MHz
czas działania [3 000 mAh]	~9 miesięcy
zasięg w terenie zabudowanym	3–4 km
liczba pomiarów w czasie doby	36
częstotliwość pomiarów	15 min
czas operacyjny	21:00–06:00 CEST
czujniki pomiarowe	jasność, temperatura, wilgotność
kąt zbierania danych	20°
klasa szczelności	IP65

*Źródło: opracowanie własne.*

Opracowane urządzenie jest dodatkowo programowalne, co umożliwia dostosowanie kodu programu do innych zadań, a jego kompaktowość oraz w pełni zdalny odczyt w czasie rzeczywistym było podstawą wykorzystania do realizacji wertykalnych pomiarów przy użyciu mobilnej platformy – bezzałogowego statku powietrznego (BSP), o typie wielowirnikowca.

Dostosowując urządzenie do pomiarów z wykorzystaniem BSP, konieczna była modyfikacja umiejscowienia otworu w obudowie, przez który czujnik światła dokonuje pomiarów oraz anteny transmisyjnej, tak, aby nie kolidowała ona z elementami zespołu napędowego – śmigłami. Niezbędne było także zwiększenie częstotliwości odczytów do 15-sekundowego interwału, co w istotny sposób zwiększyło ilość przesyłanych danych w czasie pojedynczego lotu.

### 3. Główne założenia prowadzenia wertykalnych pomiarów jasności nocnego nieba oraz opis stanowisk badawczych

Wertykalne pomiary zanieczyszczenia światłem nocnego nieba miały na celu zbadanie pionowej zmienności zjawiska wraz z oddalaniem się zestawu pomiarowego od powierzchni gruntu i występujących na nim źródeł światła. Dodatkowo starano się także uzupełnić dotychczas posiadaną wiedzę o skażeniu nocnego nieba nadmierną emisją sztucznego światła o pomiarach realizowanych ze zmianą odległości od naziemnych

emitorów i przy okazji spróbować wyznaczyć granicę zjawiska w przestrzeni trójwymiarowej.

### 3.1. Metodologia pomiarów

Do realizacji zaplanowanych działań projektowych wykorzystano bezzałogowy statek powietrzny firmy DJI model Matrice 210 RTK z zamontowanym na górnym pokładzie urządzeniem pomiarowym. Cały zestaw pomiarowy (rozumiany dalej, jako BSP z autorskim urządzeniem pomiarowym) przedstawiony został na rysunku 2.

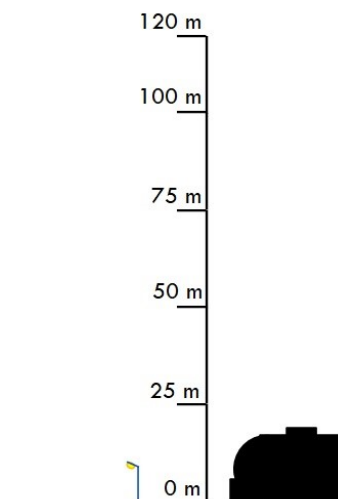


**Rys. 2.** Autorskie urządzenie pomiarowe zamontowane na pokładzie wielowirnikowca firmy DJI modelu Matrice 201 RTK

*Źródło: fot. Dominika Karpińska.*

Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów terenowych konieczne było zadbanie o poprawność działania wszystkich istotnych elementów technicznych, a także przestrzeganie uwarunkowań prawnych dotyczących lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi w Polsce. Według obowiązujących przepisów prawa, statek powietrzny musi zawierać oznaczenie numerem operatora, pilot statku powietrznego powinien posiadać stosowne uprawnienia nadane przez Urząd Lotnictwa Cywilnego, a jego operator odpowiednie ubezpieczenie lotnicze adekwatne do posiadanego bezzałogowego systemu latającego oraz miejsca, założeń i czasu realizowanych misji powietrznych. W ostatnio wymienionym elemencie kluczowa jest możliwość wykonywania lotów w czasie od 30 minut po zachodzie słońca, do 30 minut przed jego wschodem. Dodatkowo, przed rozpoczęciem każdego lotu BSP, korzystając z urzędowej aplikacji DroneRadar, istnieje obowiązek sprawdzenia aktualnych obostrzeń w danej przestrzeni powietrznej i strefie geograficznej, zgłaszania nalotów i uzyskania zgody na start (tzw. *check-in*), a po wylądowaniu poinformowanie o fakcie zakończenia misji.

Wertykalne pomiary wartości jasności powierzchniowej nocnego nieba zostały zaplanowane na dwóch łatwo dostępnych, reprezentatywnych stanowiskach, możliwie skutecznie oddalonych od punktowych źródeł światła, ale będących w zasięgu funkcjonalnym sieci LoRaWAN. Miejsca realizacji pomiarów zostały scharakteryzowane w następnym podrozdziale.



**Rys. 3.** Schematyczne przedstawienie zakładanych wysokości akwizycji danych pomiarowych dotyczących zanieczyszczenia nocnego nieba światłem

*Źródło: opracowanie własne.*

Pierwszym etapem działań był rekonesans terenowy wraz z przeprowadzeniem testów służących wyborowi optymalnej metody pracy. Wstępne założenia zakładały dokonywanie nalotu BSP na zadanych następujących wysokościach: 0, 25, 50, 75, 100 i 120 m nad poziomem gruntu (rys. 3). Zaplanowana górna wysokość lotu wynika wyłącznie z obowiązujących w Polsce przepisów *Prawa lotniczego* (Dz.U. z 2020 r., poz. 1970, z późn. zm.), a nie z technicznych możliwości czy ograniczeń wykorzystywanego statku powietrznego.

Rozpoczynając każdą sesję pomiarową, rozumianą jako pojedynczy start, pomiar i lądowanie nad danym stanowiskiem, należało na początku połączyć urządzenie pomiarowe z najbliższą stacją bazową i sprawdzić poprawność transmisji danych. Po umieszczeniu zestawu pomiarowego na punkcie startowym wykonywane były czynności typowe dla misji lotniczej oraz kolejno – wzniesienie, zawis na zadanej wysokości, pomiar i lądowanie. Według przyjętych wstępnych założeń na każdej zaplanowanej wysokości dokonywany był jeden pełny nalot. Plan nalogu ustalono

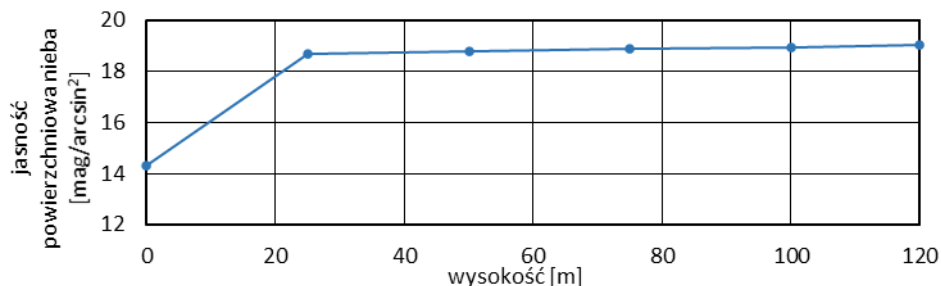
wcześniej w przeznaczonej do tego rodzaju BSP aplikacji DJI, tworząc najprostszą czworokątną zamkniętą trasę (rys. 4), w której w punktach węzłowych dokonywany był pomiar. Po zakończonym locie i pomiarze testowym zauważono liczne ograniczenia przyjętej metody akwizycji danych. Każdorazowe wznoszenie i lądowanie statku powietrznego przy realizacji pojedynczego nalotu powodowało niepotrzebny, dodatkowy pobór energii z akumulatorów. Wpływało to na operacyjny czas pracy, przez co realizacja zadania pomiarowego była nieoptymalizowana pod względem liczby startów i lądowań, czasu pojedynczej akwizycji danych oraz sumarycznego czasu działania na jednym stanowisku. Ponadto, realizacja pomiarów w punktach węzłowych po czworokątnej trasie istotnie wpływała na zróżnicowanie rejestrowanych danych. Było to spowodowane głównie niejednorodnością warunków oświetlenia, w szczególności w początkowej, najniższej fazie lotów, wynikającą z wpływu różnych warunków oświetleniowych najbliższego otoczenia punktów zawisu/pomiaru.



**Rys. 4.** Przedstawienie punktów węzłowych planu nalotu

*Źródło: opracowanie własne.*

Po przeprowadzonych testach, szczegółowej analizie poddano uzyskane wyniki pokazujące rozkład i zmienność wartości w odniesieniu do zakresów wysokości, na których dokonywano rejestracji. Prezentując dane pomiarowe na wykresie liniowym, zauważono największą zmienność badanej jasności nocnego nieba w strefie pomiędzy punktem startu a wysokością około 25 m nad poziomem gruntu (rys. 5). W tym właśnie pionowym zakresie pomiarowym występują najbardziej istotne i silne źródła oświetlenia zewnętrznego oraz emitory sztucznego światła.



**Rys. 5.** Wykres przedstawiający dane zebrane podczas pomiarów testowych

*Źródło: opracowanie własne.*

Zebrane doświadczenia z lotów testowych oraz opracowane wyniki z tego etapu pozwoliły na ostateczne dopracowanie metodyki przeprowadzenia pomiarów wertykalnych z wykorzystaniem BSP. Uwzględniając wszystkie powyższe czynniki przyjęto, że konieczne jest bardziej wnikliwe poznanie charakterystyki zjawiska w początkowej fazie lotu poprzez zwiększenie liczby pomiarów pomiędzy zakresem 0 a 25 m nad powierzchnią gruntu. Z tego względu zagęszczono pomiary w niższej fazie lotu, do co 2,5 m, a kolejne realizowano na wysokościach 30, 50, 75, 100 oraz 120 m. Ustalono także nową koncepcję samego lotu BSP, polegającą na pionowym wznoszeniu się na kolejne przyjęte wysokości, na których następował zawis trwający około 1 minuty. Wystarczyło to na realizację 4 powtarzalnych pomiarów, po których operator BSP wznosił zestaw pomiarowy na kolejną zaplanowaną wysokość.

Każda sesja pomiarowa na pojedynczym stanowisku ograniczona była maksymalnym czasem lotu na jednym zestawie akumulatorów. W przypadku lotu bez obciążenia wykorzystywany BSP firmy DJI, zgodnie ze specyfikacją techniczną, powinien latać przez około 32 minuty. Jednak przy pełnym obciążeniu czas ten ograniczony jest do około 24 minut, co wystarczało jednak na bezpieczną realizację zadania z przyjętym zapasem czasu na ewentualną sytuację awaryjną.

W zależności od warunków pogodowych (głównym elementem wpływającym na większe zużycie energii jest wiatr) niezbędny czas realizacji pełnych pomiarów w przyjętym cyklu działania na 16 poziomach wysokościowych szacowany był na około 20 minut. Przyjęte założenia okazały się słuszne i wszystkie zrealizowane loty nie przekroczyły czasu 23 minut. Podczas pomiarów wertykalnych przez cały czas realizowany był podgląd „na żywo” przesyłanych wartości, co pozwalało na ich pełną kontrolę oraz nadzór nad jakością procesu akwizycji, przy którym następowała automatyczna archiwizacja zbieranych danych na zewnętrznym serwerze.

Wszystkie wykonane pomiary dotyczące badania zmienności wertykalnej jasności nocnego nieba dokonywano w czasie, gdy Słońce było najniżej pod horyzontem, tak, aby miało jak najmniejszy wpływ na uzyskane wartości.

### 3.2. Stanowiska pomiarowe

Pomiar wertykalnej zmienności jasności nocnego nieba przeprowadzono na dwóch stanowiskach badawczych, oddalonych od siebie w linii prostej o około 1,5 km.

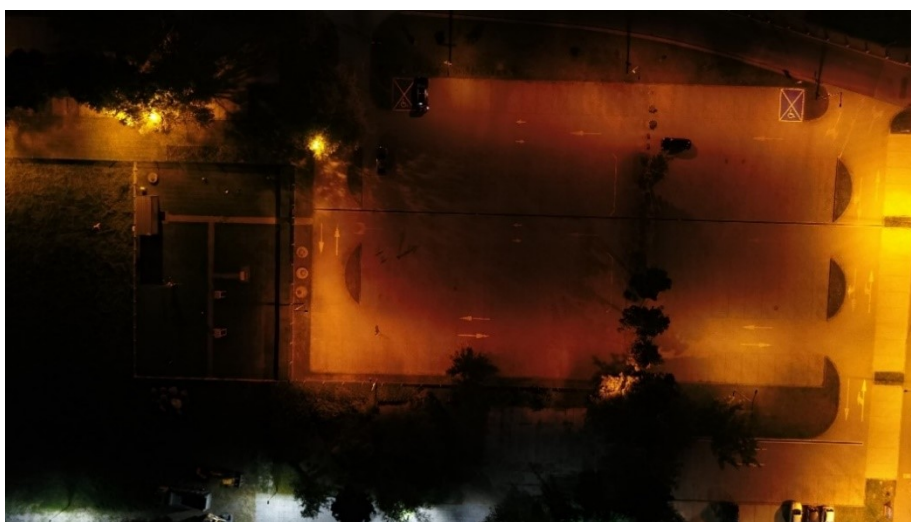
Pierwszym wybranym stanowiskiem pomiarowym był parking kampusu Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (rys. 6). Jest to stanowisko oddalone od ścisłego centrum miasta – Zespołu Staromiejskiego – o około 3 km. Wysokość punktu startowego wyniosła 48,6 m n.p.m., a dokładna lokalizacja w przestrzeni geograficznej startu i prowadzenia pomiarów to: 53.021214 N i 18.567517 E.



**Rys. 6.** Otoczenie stanowiska pomiarowego zlokalizowanego na terenie kampusu UMK w dzień (dolne zdjęcie) oraz w nocy (górne zdjęcie)

*Źródło: fot. Mieczysław Kunz.*

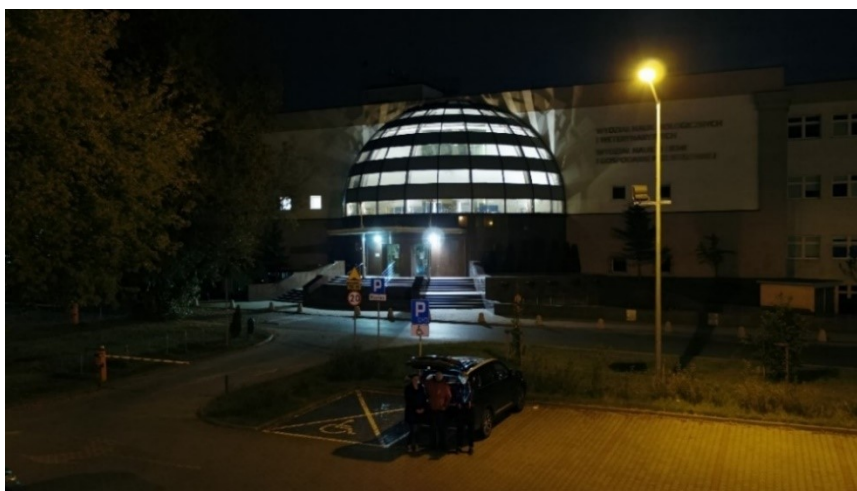
W strefie 25 m od punktu startu zestawu pomiarowego nie występowało oświetlenie uliczne, natomiast w promieniu 50 m zlokalizowanych było siedem latarni infrastruktury drogowej, przy czym najbliższa skierowana była w stronę punktu pomiarowego. W buforze do 100 m znajdowało się 21 takich źródeł światła. Istniejące warunki oświetleniowe dobrze widoczne są na zdjęciu wykonanym przez BSP (rys. 7).



**Rys. 7.** Stanowisko pomiarowe na terenie kampusu UMK – pionowe zdjęcie wykonane z pokładu BSP z wysokości 100 m

*Źródło: fot. Mieczysław Kunz.*

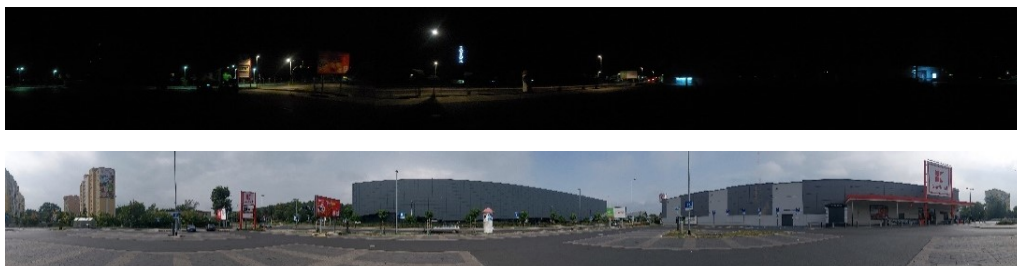
W otoczeniu stanowiska pomiarowego znajduje się kilkupiętrowa zabudowa Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, w tym charakterystyczna fasada Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej posiadająca ciekawą iluminację świetlną (rys. 8). Przy punkcie startowym, w bezpośrednim jego sąsiedztwie, znajduje się jedno z urzędzeń założonej stacjonarnej sieci pomiarowej na terenie Torunia, dzięki czemu możliwe było porównanie jego wyników z wynikami uzyskanymi przez mobilny zestaw pomiarowy.



**Rys. 8.** Otoczenie punktu pomiarowego na terenie kampusu UMK – ukośne zdjęcie wykonane z pokładu BSP z wysokości 5 m

*Źródło: fot. Mieczysław Kunz.*

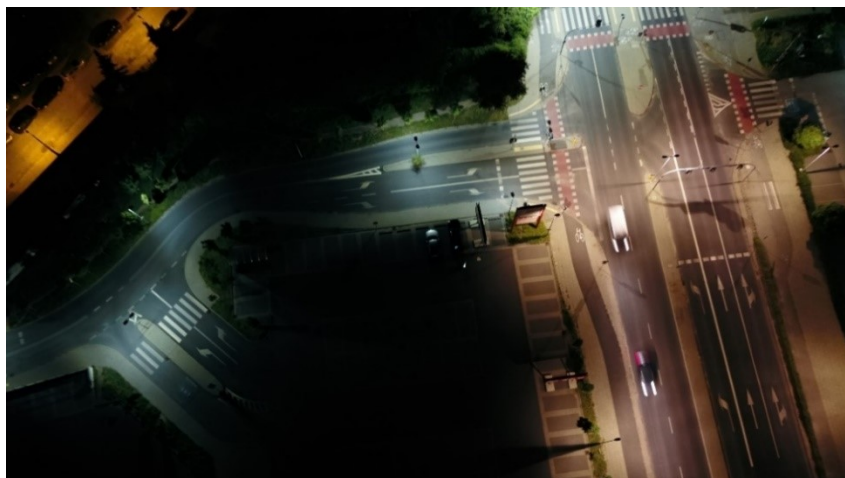
Drugim wybranym miejscem do realizacji pomiarów wertykalnych było stanowisko zlokalizowane na parkingu przed sklepem wielkopowierzchniowym przy ulicy Bema w Toruniu (rys. 9). Jest to stanowisko oddalone od ścisłego centrum miasta o około 1,5 km. Wysokość punktu startowego wynosiła 54,6 m n.p.m., a dokładna lokalizacja w przestrzeni geograficznej startu i prowadzenia pomiarów to: 53.016653 N i 18.588872 E.



**Rys. 9.** Otoczenie stanowiska pomiarowego zlokalizowanego na parkingu przy ul. Bema w dzień (dolne zdjęcie) oraz w nocy (górne zdjęcie)

*Źródło: fot. Dominika Karpińska.*

W 25-metrowym buforze od punktu startu BSP występowała jedna świecąca latarnia uliczna infrastruktury drogowej skierowana w przeciwnym kierunku, a w pobliżu punktu startu umiejscowione były także dwie inne latarnie oświetlające parking sklepu wielkopowierzchniowego, które jednak nie były one włączone w czasie realizacji pomiarów. W promieniu do 50 m zlokalizowanych było osiem latarni ulicznych, natomiast w odległości już do 100 m znajdowało się ich 28. Zdjęcie wykonane z pokładu BSP pokazuje zastane warunki oświetleniowe na tym stanowisku (rys. 10). W otoczeniu stanowiska pomiarowego występowała wysoka zabudowa wielorodzinna, sklep wielkopowierzchniowy oraz hala sportowa (rys. 11).



**Rys. 10.** Stanowisko pomiarowe na parkingu przy ul. Bema – pionowe zdjęcie wykonane z pokładu BSP z wysokości 100 m

*Źródło: fot. Mieczysław Kunz.*



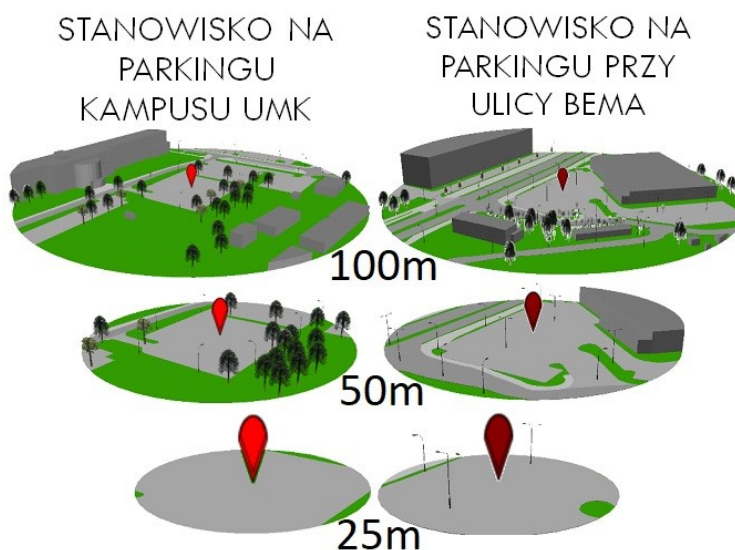
**Rys. 11.** Otoczenie punktu pomiarowego na parkingu przy ul. Bema – ukośne zdjęcie wykonane z pokładu BSP z wysokości 5 m

*Źródło: fot. Mieczysław Kunz.*



W sąsiedztwie punktu startowego położone są dwa urządzenia założonej stacjonarnej sieci pomiarowej, dzięki temu możliwe było porównanie ich wyników z wynikami uzyskanymi przez mobilny zestaw pomiarowy.

Wybrane stanowiska pomiarowe zróżnicowane były zarówno pod kątem występowania źródeł światła, jak i struktury pokrycia/użytkowania terenu najbliższego otoczenia. W celu przedstawienia różnic między pokryciem/użytkowaniem terenu na obu wybranych stanowiskach wykonano wizualizację punktów pomiarowych w trzech strefach buforowych: 25, 50 i 100 m (rys. 12).



**Rys. 12.** Wizualizacja pokrycia/użytkowania terenu stanowisk pomiarowych w trzech strefach buforowych (25, 50 i 100 m)

*Źródło: opracowanie własne.*

Czerwonym znacznikiem zaznaczono miejsce startu bezzałogowego statku powietrznego podczas każdej sesji pomiarowej. W górnej części rysunku przedstawiono wizualizację pokrycia terenu w buforze 100 m od punktu startu. Pokazuje ona w perspektywiczny sposób otoczenie punktu wraz z sąsiadującą zabudową. Kolejne dwa mniejsze bufory – 50 oraz 25 m uwypuklają głównie istniejącą infrastrukturę oświetleniową, oraz kierunek, w jakim jest ona zwrócona w trakcie działania.

#### 4. Analiza wykonanych pomiarów w gradiencie wertykalnym

Pomiar zmienności jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym realizowany był kilkakrotnie na każdym stanowisku pomiarowym w okresie od lipca do września 2021 roku. W ramach zaplanowanej akwizycji danych wykonano łącznie pięć sesji

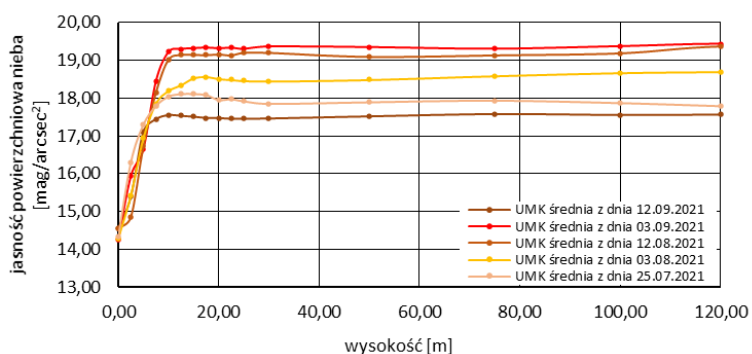
pomiarowych, w tym cztery na obu wytypowanych stanowiskach, a jedną – pierwszą, w której dokonywany został pomiar z wykorzystaniem BSP w cyklu, tylko na stanowisku zlokalizowanym na parkingu kampusu UMK w Toruniu. Sesje pomiarowe odbyły się w następujących terminach: 25 lipca, 3 sierpnia, 12 sierpnia, 3 września oraz 12 września 2021 roku. Wszystkie pomiary terenowe zrealizowano podczas bezchmurnej lub tylko częściowo zachmurzonej nocy.

Wszystkie zebrane dane pomiarowe przedstawione zostały na kolejnych wykresach (rys. 13–16), na których porównano jasność nieba w odniesieniu do wysokości dokonywanego pomiaru z wykorzystaniem BSP. Zmierzone jasności nocnego nieba zobrazowano za pomocą skali  $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ , tak, aby możliwe było porównanie uzyskanych wyników z wcześniejszymi pomiarami oraz z badaniami innych grup badawczych pokazanych w publikacjach branżowych. Analizując zamieszczone wykresy należy zwrócić uwagę, że przyjęta skala na osi rzędnych jest skalą logarytmiczną i odwrotną, przez co wysokie wartości odpowiadają ciemniejszemu niebu, a niskie – jaśniejszemu.

Rysunek 13 obrazuje wyniki wszystkich pomiarów zarejestrowanych na stanowisku zlokalizowanym na parkingu kampusu UMK w Toruniu. Charakterystyczną cechą wszystkich zaprezentowanych wyników w tej lokalizacji jest początkowe wyraźne obniżanie się jasności nocnego nieba obserwowane aż do osiągnięcia wysokości około 10 m nad powierzchnią gruntu. Po przekroczeniu tej umownej granicy za każdym razem następuje stabilizacja pomiarów na określonym poziomie wartości. Wysokość ta odpowiada przekroczeniu orientacyjnej linii wysokości oprawy oświetleniowej latarni ulicznych występujących w otoczeniu stanowiska pomiarowego.

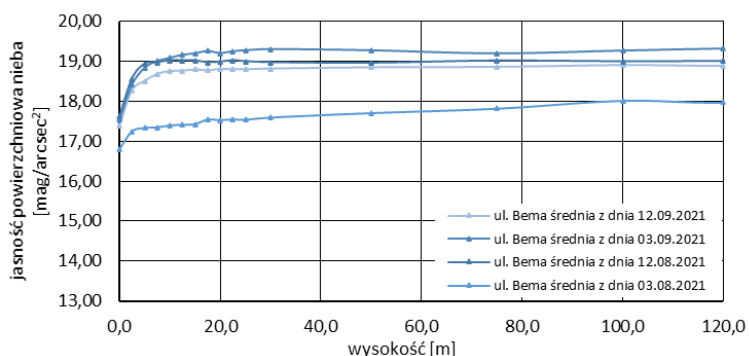
Podobna sytuacja jest pokazana na kolejnym wykresie (rys. 14), gdzie przedstawione są dane uzyskane na stanowisku pomiarowym położonym na parkingu przy ul. Bema w Toruniu. Tam również na wysokości około 10 m następuje stabilizacja wartości pomiarowych. Przy porównaniu dwóch przedstawianych wykresów (rys. 13 i 14) można zauważyć, że wykonane pomiary między startem (poziom gruntu) a lotem do około 10 m znacznie się różnią. Na stanowisku na parkingu UMK mierzone niebo jest znacznie jaśniejsze w tej części lotu, co jest spowodowane faktem, iż okoliczne latarnie bezpośrednio oświetlały obszar startu BSP. Mimo iż start następował w miejscu stosunkowo odległym od infrastruktury oświetleniowej, to wciąż miała ona znaczny wpływ na dokonywany pomiar. Na stanowisku na parkingu przy ul. Bema lampy były odwrócone w odniesieniu do punktu startu BSP i oświetlały otoczenie, w tym okoliczną drogę. W celu porównania pozyskanych danych z obu stanowisk, zestawiono je na jednym wspólnym wykresie (rys. 15). Wykres ten przedstawia dane otrzymane podczas pomiaru wykonanego w bezchmurną noc 3 września 2021 roku. Bardzo wyraźnie zaznaczona jest wcześniej omawiana różnica między początkowymi pomiarami w zakresie wysokości od 0 do 10 m nad poziomem gruntu. Kolejną prawidłowością jest większa wartość jasności nocnego nieba na stanowisku na parkingu przy ul. Bema w stosunku do parkingu na kampusie UMK mierzona już po stabilizacji odczytów powyżej 10 m nad poziomem gruntu. Różnica między stanowiskami wydaje się nieznaczna, ale odpowiada wcześniejszym badaniom

mówiącym, że im bliżej centrum miasta, które jest miejską wyspą światła [19, 20], tym niebo jest jaśniejsze. Jednak, aby móc w pełni udokumentować powyższy wniosek konieczne jest przeprowadzenie dodatkowej kampanii pomiarowej także na innych stanowiskach zlokalizowanych w pierścieniu okalającym Zespół Staromiejski. Ostatni wykres (rys. 16) przedstawia porównanie pomiarów z dwóch terminów zrealizowanych podczas nocy o zmiennym zachmurzeniu. Niestety w trakcie całego eksperymentu, nie udało się dokonać pomiarów w czasie nocy z pełnym zachmurzeniem, dlatego zestawiono dwa przykładowe dni, gdzie na przemian na pierwszym lub drugim stanowisku występowało zachmurzenie. Po analizie przebiegu krzywych pomiarowych można zauważyć, iż przy większym zachmurzeniu jasność nieba znacznie się zwiększa, co odpowiada wynikom przedstawionym we wcześniejszych pracach oraz uzyskanych przez inne grupy badawcze [17, 19, 20, 39].



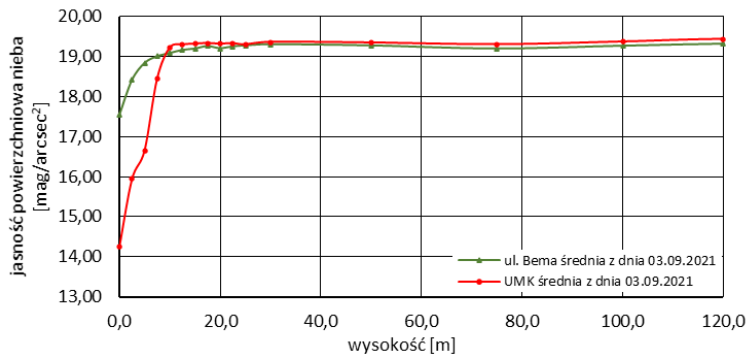
**Rys. 13.** Zestawienie uzyskanych wyników obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym na stanowisku pomiarowym zlokalizowanym na parkingu UMK w Toruniu

*Źródło: opracowanie własne.*



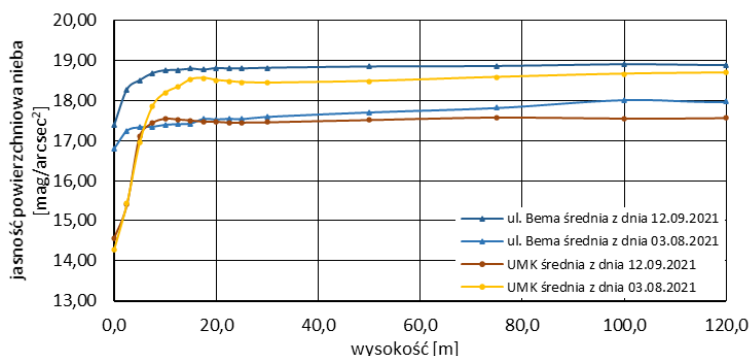
**Rys. 14.** Zestawienie uzyskanych wyników obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym na stanowisku pomiarowym zlokalizowanym na parkingu przy ul. Bema w Toruniu

*Źródło: opracowanie własne.*



**Rys. 15.** Porównanie uzyskanych wyników obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym na obu stanowiskach pomiarowych w czasie nocy bezchmurnej

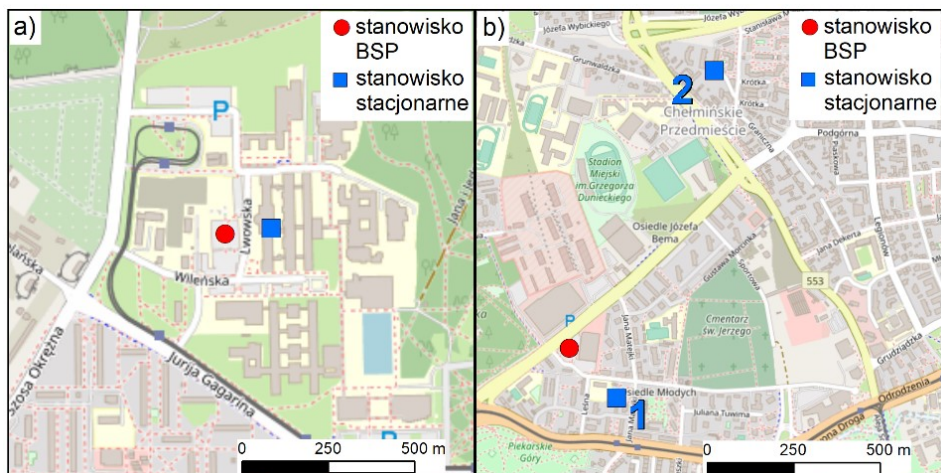
*Źródło: opracowanie własne.*



**Rys. 16.** Porównanie uzyskanych wyników obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym na obu stanowiskach pomiarowych w czasie nocy o zmiennym zachmurzeniu

*Źródło: opracowanie własne.*

Dodatkowo, otrzymane wyniki pomiarów jasności nocnego nieba, wykonywane z wykorzystaniem bezałogowej jednostki latającej na określonej wysokości zestawiono z wynikami zarejestrowanymi przez urządzenia funkcjonujące w stacjonarnej sieci monitorującej jasność nocnego nieba na terenie Torunia. W bezpośrednim sąsiedztwie stanowiska na parkingu kampusu UMK znajdowało się jedno takie urządzenie, natomiast w pobliżu drugiego stanowiska na parkingu przy ulicy Bema zlokalizowane są dwa urządzenia (rys. 17). Zestawienie wyników pomiarów w poszczególnych terminach przedstawia tabela 2, a zaprezentowane wartości dotyczą rejestracji z tej samej wysokości względnej, tj. odniesionej do zbliżonej wysokości nad poziomem gruntu zamontowanego urządzenia stacjonarnego.



Rys. 17. Poglądowe rozmieszczenie stacjonarnych punktów pomiarowych położonych w okolicach: a) parkingu kampusu UMK, b) parkingu przy ul. Bema

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Porównanie wyników otrzymanych z pomiarów z wykorzystaniem BSP oraz z urządzeń pracujących w ramach stacjonarnej sieci pomiarowej na wysokości 10 m nad poziomem gruntu

Data	Pomiar z wykorzystaniem BSP [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		Pomiar z urządzeń stacjonarnych w pobliżu stanowiska pomiarowego BSP [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		
	Parking kampus UMK	Parking ul. Bema	Kampus UMK	ul. Bema (1)	ul. Bema (2)
25.07.2021	17,95	–	17,94	–	–
03.08.2021	18,51	17,59	18,55	–	17,61
12.08.2021	19,16	18,97	19,17	18,16	18,96
03.09.2021	19,32	19,31	19,26	18,71	19,16
12.09.2021	17,47	18,82	17,49	18,38	18,78

Źródło: opracowanie własne.

Analizując powyższe zestawienie można zauważyć, że przedstawione wyniki są do siebie zbliżone. W szczególności urządzenia pomiarowe działające na stanowisku położonym na terenie kampusu UMK rejestrują podobne wartości. Dowodzi to poprawności i zasadności wykonywania pomiarów za pomocą bezzałogowych statków powietrznych oraz otwiera kolejne możliwości do kontynuowania bardziej zaawansowanych prac badawczych nad problematyką wertykalnej zmienności jasności nocnego nieba.

## 5. Wnioski i podsumowanie

Przemysłany i ukierunkowany monitoring wybranych elementów środowiska geograficznego jest potrzebny. Należy prowadzić go w całej trójwymiarowej przestrzeni geograficznej, ze względu na skomplikowany proces zmienności, zależności i przepływu składowych, zarówno od strony poznania przyczyn, jak i konsekwencji oraz skutków analizowanego zjawiska. Dotychczas prowadzone poziome – horyzontalne pomiary zmienności danego czynnika należy w miarę pojawiających się możliwości uzupełniać pomiarami pionowymi – wertykalnymi, które w zależności od rodzaju zjawiska analizowane będą w różnym kierunku w stosunku do miejsca interakcji i głównego działania. Wyraźnie ukierunkowanie to jest widoczne na przykładzie analizy zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba. Łuna świetlna otaczająca aglomerację miejską i mająca swoją główną przyczynę w nadmiernym lub niewłaściwie zaprojektowanym oświetleniu terenów zurbanizowanych, w tym ciągów komunikacyjnych, znacznie rozciąga się zarówno w gradiencie poziomym, jak i pionowym, co zauważalne jest już z niewielkiej odległości od skupisk ludzkich.

Wyniki uzyskane w opisanym eksperymencie pokazują, iż najbardziej istotna zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym występuje bezpośrednio po przekroczeniu wysokości użytkowej, standardowej infrastruktury oświetleniowej będącej typowym elementem krajobrazu miejskiego.

Mierzone wartości powyżej tej granicy stabilizują się na określonym poziomie i różnią się o mniej niż  $0,3 \text{ mag/arcsec}^2$ . Pokazuje to, iż z tego powodu pomiarów jasności nocnego nieba powyżej tej linii można dokonywać na zróżnicowanej wysokości i nie wpływa to na wzmocnienie czy osłabienie uzyskanych wartości. Daje to duże możliwości w wyborze miejsca do montażu automatycznych urządzeń pomiarowych, w tym autorskiej konstrukcji, do monitoringu zanieczyszczenia światłem nocnego nieba w różnych innych lokalizacjach.

Wyniki otrzymane z naziemnych, stacjonarnych urządzeń pomiarowych działających w ramach systemu monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba w Toruniu, jak i z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych są w pełni porównywalne, co pokazuje, iż takie pomiary są możliwe do realizacji, a uzyskane wartości powtarzalne i miarodajne. Akwizycja danych dotyczących zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem realizowana przez bezzałogowe statki powietrzne może być zarówno alternatywą, jak i wartościowym uzupełnieniem monitoringu tego bardzo niekorzystnego dla zdrowia i funkcjonowania człowieka oraz innych organizmów żywych zjawiska.

Przeprowadzone badania pokazały również, iż przed bezzałogowymi statkami latającymi otwierają się kolejne możliwości zastosowania i nowe perspektywy interdyscyplinarnej kooperacji. Do tej pory były traktowane jako uzupełnienie luki pułapowej w zakresie zdalnego, głównie satelitarnego, ale także lotniczego, pomiaru energii świetlnej promieniowania emitowanego z danego obszaru, a obecnie mogą służyć także pomiarowi jasności powierzchniowej i zmienności pionowej sztucznej poświaty niebieskiej.

## Literatura

- [1] Para A.K., Para A.W., *Świadomość skażenia otoczenia człowieka radonem*, Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 2013, 22, nr 59, s. 88–97.
- [2] Wang L.K., Pereira N.C., Hung Y.T., *Air Pollution Control Engineering, Handbook of Environmental Engineering. Vol. 1*, Humana Press, Totowa, New Jersey, 2004.
- [3] Qadri H., Bhat R.A., Mehmood M.A., Dar G.H., *Fresh Water Pollution Dynamics and Remediation*, Springer, Singapur, 2020.
- [4] Woźny A., Dobosz M., Pacana A., *Wpływ hałasu na jakość pracy*, Humanities and Social Sciences, 2014, 29, 21(2), s. 251–258, DOI: 10.7862/rz.2014.hss.31.
- [5] Wyszkowski M., Wyszowska J., *Zanieczyszczenie gleby kadmem a zawartość makropierwiastków w roślinach*, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, 2007, 3, s. 231–235.
- [6] Longcore T., Rich C., DelBusso L., *Artificial Night Lighting and Protected Lands*, Natural Resource Report, 2017, 1493.
- [7] Jechow A., Ribas S.J., Canal-Domingo R., Holker F., Kolláth Z., Kyba C.C.M., *Tracking the dynamics of skyglow with differential photometry using a digital camera with fisheye lens*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 209, s. 212–223, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.01.032.
- [8] Depledge M., Godard-Codding C.A.J., Bowen R.E., *Light pollution in the sea*, Marine Pollution Bulletin, 2010, nr 60(9), s. 1383–5, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.08.002.
- [9] Jones J., Francis C.M., *The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses*, Journal of Avian Biology, 2003, 34, s. 328–333, DOI: 10.1111/j.0908–8857.2003.03183.x.
- [10] Skwarło-Sońta K., *Melatonina: hormon snu czy hormon ciemności?*, Kosmos, 2014, 63, 2, s. 223–231.
- [11] Stevens R.G., *Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence*, International Journal of Epidemiology, 2009, 38, s. 1–8.
- [12] Connors B.M., McConnell A., Routledge R., *Effect of artificial light on marine invertebrate and fish abundance in an area of salmon farming*, Marine Ecology Progress, 2010, 419, s. 147–156, DOI: 10.3354/meps08822.
- [13] Falchi F., Cinzano P., Elvidge C., Keith D., Haim A., *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility*, Journal of Environmental Management, 2011, 92, s. 2714–2722, DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.029.
- [14] Navara K.J., Nelson R.J., *The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences*, Journal of Pineal Research, 2007, 43, 3, s. 215–224, DOI:10.1111/j.1600–079X.2007.00473.x.
- [15] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, 2016, 2, DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- [16] Jechow A., Kyba C.C.M., Kolláth Z., Lerner A., Hänel A., Shashar N., Hölker F., *Measuring Light Pollution with Fisheye Lens Imagery from A Moving Boat, A Proof of Concept*, International Journal of Sustainable Lighting, 2017, 36, 1, s. 15–255, DOI: 10.26607/ijsl.v19i1.62.
- [17] Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.

- [18] Kołomański S., Wiernasz A., Borodacz K., Białek R., Mikołajczyk P., *ALPS – stacje obserwacyjne zanieczyszczenia światłem* [w:] *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, A. Kotarba (red.), Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 2019, s. 153–166.
- [19] Karpińska D., Kunz M., *Analysis of light pollution of the night sky in Toruń (Poland)*, Civil and Environmental Engineering Reports, 2020, s. 155–172, DOI: 10.2478/ceer–2020–0057.
- [20] Karpińska D., Kunz M., *Light pollution in the night sky of Toruń in the summer season*, Bulletin of Geography. Physical Geography, 2019, 17, s. 91–100.
- [21] Karpińska D., Kunz M., *Analysis of the visibility and signal strength of the LoRaWAN network in an urbanized area on the example of the Bielany campus of the Nicolaus Copernicus University in Toruń*, Book of Abstracts, Third World Conference of the Society for Urban Ecology, Poznań, 2021, s. 143–144.
- [22] Karpińska D., Kunz M., *Rekonstrukcja zasięgu widoczności sieci LoRaWAN na terenie kampusu UMK w Toruniu* [w:] *Środowisko przyrodnicze jako obszar badań*, A. Młynarczyk (red.), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, 2021, s. 47–60.
- [23] Karpińska D., Kunz M., *Analysis of the visibility and signal strength of the LoRaWAN network in an urbanized area – a case study of the Bielany campus at the Nicolaus Copernicus University in Toruń*, Bulletin of Geography. Socio-Economic Series, 2021, 54, s. 137–149, DOI: 10.2478/bog–2021–0039.
- [24] Kunz M., *Nowoczesne metody i narzędzia telegoinformacyjne służące pozyskiwaniu informacji geograficznej* [w:] *Systemy informacji geograficznej w zarządzaniu obszarami chronionymi – od teorii do praktyki*, M. Kunz, A. Nienartowicz (red.), Wyd. FUH DANIEL, Tuchola – Toruń, 2015, ss. 85–96.
- [25] Ścieżor T., *Metody pomiaru jasności nocnego nieba*, Sekcja Ochrony Ciemnego Nieba Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii, <http://lightpollution.pk.edu.pl/SOCN/metody.php> (dostęp: 10.12.2021).
- [26] Kołomański S., *Zanieczyszczenie światłem i ciemność* [w:] *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, M. Roge–Wiśniewska, K. Tomasik (red.), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 2015, s. 29–46.
- [27] Ścieżor T., *Określenie charakteru zmian jasności nocnego nieba w Polsce w latach 1994–2009 na podstawie amatorskich obserwacji komet* [w:] *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, M. Roge–Wiśniewska, K. Tomasik (red.), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 2015, s. 61–80.
- [28] Hänel A., Posch T., Ribas S.J., Aubé M., Duriscoe D., Jechow A., Kolláth Z., Lolkema D.E., Moore C., Schmidt N., Spoelstra H., Wuchterl G., Kyba C.C.M., *Measuring night sky brightness: methods and challenges*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 205, s. 278–290, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008.
- [29] Kolláth Z., *Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park*, Journal of Physics Conference Series, 2010, 218, 1, art. 012001, DOI: 10.1088/1742–6596/218/1/012001.
- [30] Pun C.S.J., So C.W., Leung W.Y., Wong C.F., *Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 139, s. 90–108, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.014.



- [31] Ścieżor T., *Naturalne i antropogeniczne czynniki łuny świetlnej nocnego nieba*, Monografie Politechniki Krakowskiej, 2018, s. 71–83.
- [32] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., Baugh K.E., *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2000, 318, s. 641–657.
- [33] Elvidge C.D., Baugh K.E., Zhizhin M., Hsu F. C., *Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights*, Proceedings of the Asia–Pacific Advanced Network, 2013, 35, s. 62–69, DOI: 10.7125/APAN.35.7.
- [34] Zhang C., Pei Y., Li J., Qin Q., Yue J., *Application of LuoJia 1–01 Nighttime Images for Detecting the Light Changes for the 2019 Spring Festival in Western Cities*, Remote Sensing, 2020, 12, s. 1416, DOI: 10.3390/rs12091416
- [35] Karpińska D., Kunz M., *Ochrona nocnego nieba – wyzwanie dla Rezerwatu Biosfery Bory Tucholskie [w:] Rola i funkcjonowanie parków krajobrazowych w rezerwatach biosfery*, M. Kunz (red.), Wydawnictwo Naukowe UMK w Toruniu, 2020, s. 329–346.
- [36] Piątek Z., *LoRaWAN i SigFox – dwa standardy sieci IoT*, <https://przemysl-40.pl/index.php/2018/07/30/lorawan-i-sigfox-dwa-standardy-sieci-iot/> (dostęp: 22.06.2020).
- [37] STMicroelectronics, *Lora*, <https://www.st.com/en/applications/connectivity/lora.html> (dostęp: 22.06.2020).
- [38] Tomaszewski D., *11 mitów na temat technologii LoRaWAN*, Elektronik, 2020, s. 78–81.
- [39] Ścieżor T., *The impact of clouds on the brightness of the night sky*, Journal of Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 247, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106962.

## VERTICAL VARIABILITY OF THE NIGHT SKY BRIGHTNESS IN URBANIZED AREAS

**Abstract:** The excessive amount of artificial light emitted to the lower atmosphere at night has already become part of the everyday landscape of the modern city and is gradually becoming a phenomenon accompanying areas outside larger human clusters. City of light islands is the subjects of targeted research conducted for several decades by scientists representing various specialities. In Toruń, systematic research on the phenomenon of light smog has been carried out for several years. The brightness of the night sky was repeatedly measured at several control points located throughout the city. The next stage of the research is the measurement of the brightness variability of the night sky in a vertical gradient. For this purpose, at two points of the city, repeatable measurements were made at set heights with the use of an unmanned aerial vehicle, onboard which an automatic light meter of its own design was installed. The results obtained in this way allowed to determine the variability of the measured sky brightness in a vertical gradient up to a height of 120 meters from the ground surface. It also allowed testing the possibility of using unmanned aerial vehicles in research on the phenomenon of light pollution.

**Keywords:** light pollution, UAV, vertical measurement, vertical gradient, urban area

# WPŁYW PANDEMII COVID-19 NA ZANIECZYSZCZENIE ŚWIETLNE NOCNEGO NIEBA

Tomasz Ścieżor

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska  
*tsciezor@pk.edu.pl*

**Streszczenie:** W 2020 roku, w związku z pandemią COVID-19 i zmniejszeniem się nocnego ruchu drogowego, władze szeregu gmin w Małopolsce podjęły decyzję o wyłączeniu ulicznego oświetlenia komunalnego w godzinach nocnych. Jest to pierwszy taki przypadek, gdy przez część roku wyłączane było oświetlenie uliczne, w dodatku na dużych obszarach oraz w miastach. W ten sposób pojawiła się niezwykła sposobność wykonania analizy, jaki udział w zanieczyszczeniu światłem ma oświetlenie komunalne ulic. W tym celu wykorzystano zarówno istniejące w Krakowie i sąsiednich gminach stacje monitoringu zanieczyszczenia świetlnego, jak również dane satelitarne dotyczące wielkości radiancji pochodzącej z miejscowości, w których następowało wyłączenie oświetlenia ulicznego. Stwierdzono, że po wyłączeniu oświetlenia komunalnego jasność powierzchniowa bezchmurnego nieba zmniejszyła się o około 40%. W każdej z analizowanych miejscowości stwierdzono również efekt znaczącego zmniejszenia się radiancji w efekcie wyłączenia oświetlenia ulicznego. W przypadku całkowitego wyłączenia oświetlenia ulicznego w danej miejscowości wielkość ta zmniejszyła się prawie o 70%.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie świetlne, radiancja, luminancja, oświetlenie uliczne, COVID-19

## 1. Wstęp

Od momentu, gdy zanieczyszczenia świetlne, zauważalne głównie w formie łuny świetlnej nocnego nieba, stało się nową formą zanieczyszczenia środowiska naturalnego, było oczywiste, że głównym jego źródłem są miasta, a w szczególności oświetlenie uliczne. W efekcie, literatura dotycząca tego zagadnienia jest bardzo

obszerna. Warto tu wspomnieć, że już w 1866 roku francuski popularyzator nauki, Amédée Guillemin, stwierdził, że w centrach dużych miast nie można dostrzec słabych gwiazd, za co jednak chyba głównie odpowiedzialny był smog, zalegający atmosferę Paryża czy Londynu [1].

W 1888 roku John A.W. Oliver stwierdził, że w mieście oświetlonym lampami gazowymi czy też elektrycznymi problematyczne staje się dostrzeżenie światła zodiakalnego [2]. Oznacza to, że pod koniec XIX wieku widoczny już się stał wpływ sztucznego oświetlenia ulicznego na obserwacje astronomiczne, w związku z czym od tego czasu możemy mówić o zanieczyszczeniu świetlnym, rozumianym tu jako antropogeniczna składowa tony świetlnej nocnego nieba. Można stwierdzić, w związku z tym, że właśnie od badania wpływu ulicznego oświetlenia miejskiego na środowisko, w szczególności na rozjaśnienie nocnego nieba, rozpoczęła się historia badań zanieczyszczenia świetlnego. Oczywiście, wpływ ten zauważyli przede wszystkim astronomowie, dla których rozwijające się miasta stały się dużym problemem w prowadzeniu obserwacji, zmuszając ich do przenoszenia się w miejsca odległe od tych silnych źródeł światła [3, 4]<sup>3</sup>. Wraz z rozwojem infrastruktury miejskich, poza niewłaściwie zaprojektowanym oświetleniem ulicznym, pojawiły się inne źródła światła podnoszące jasność tony świetlnej. Są to, w szczególności, różnego rodzaju reklamy świetlne, oświetlenie obiektów sportowych, oświetlenie zabytków, parkingów, obiektów handlowych itp. [5–9].

W ramach badań wpływu oświetlenia miejskiego na jasność nieba powstało szereg modeli teoretycznych, opisujących ten problem. Pierwsze proste modele, opisujące rozkład jasności nocnego nieba na określonych obszarach, sporządzone zostały przez Walkera w latach 70. XX wieku na podstawie danych dotyczących gęstości zaludnienia [10–12]. Podstawowy model wpływu światła miejskich na jasność nocnego nieba został opracowany w 1973 roku przez P.J. Treanora [13] i poprawiony w 1976 przez Berry'ego [14]. Na podstawie wyżej opisanych modeli powstał stosowany do dzisiaj model Garstanga [15–17]. Model Garstanga jest w dalszym ciągu rozwijany poprzez korelowanie go z danymi pomiarowymi. Obecnie modelem, opisującym najlepiej rozpraszanie światła miejskich na różnego rodzaju aerozolu atmosferycznych, jest Illumina [18], którego nową, poprawioną wersję opublikowano we wrześniu 2020 [19].

Wpływ miast na zanieczyszczenie świetlne był również przedmiotem badań terenowych. Stało się to możliwe dzięki wprowadzeniu na rynek tanich mierników jasności nieba typu *Sky Quality Meter* (SQM), które stały się pewnego rodzaju standardem pomiarowym. Jedną z pierwszych akcji pomiarowych jasności nocnego, bezchmurnego nieba z wykorzystaniem mierników SQM były pomiary tej wielkości na terenie obszaru ochrony krajobrazowej Zselic (*Zselic Landscape Protection Area*) na Węgrzech [20]. Pomiary miały na celu zarówno sprawdzenie przydatności mierników SQM do tego typu badań, jak też zmierzenie jakości nocnego nieba w nowo założonym

---

<sup>3</sup> W dawnej siedzibie obserwatorium astronomicznego w Krakowie ulokowana jest obecnie stacja meteorologiczna oraz stacja monitoringu zanieczyszczenia świetlnego, oznaczona BOT, której dane były jednymi z podstawowych przy tworzeniu niniejszego opracowania.

obszarze ochrony nocnego nieba. Innego rodzaju pomiary, wykorzystujące mierniki SQM, były wykonane w Hongkongu i okolicach w latach 2008–2009. Tym razem mierzono jasność nieba zarówno bezchmurnego, jak i zachmurzonego. W efekcie powstała mapa zanieczyszczenia świetlnego Hongkongu i okolic [21]. Pomiary były korelowane z danymi meteorologicznymi, jak też z danymi środowiskowymi dotyczącymi zawartości dwutlenku siarki, tlenków azotu, tlenku węgla i pyłów zawieszonych.

Pomiary te były kontynuowane w osiemnastu wybranych punktach pomiarowych w latach 2010–2013 [22]. W tym samym okresie (od listopada 2008 roku do stycznia 2010 roku) podobne pomiary, również wykorzystujące mierniki SQM, wykonywane były na obszarze Krakowa i okolic przez zespół Pracowni Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego, działający na Politechnice Krakowskiej (LPML), kierowany przez autora niniejszej pracy [23, 24]. Pomiary wykonywane były każdej nocy przez ponad rok w kilkudziesięciu punktach pomiarowych [25]. Otrzymane wyniki okazały się zgodne z wartościami przewidywanymi przez mapy tzw. Atlasu Zanieczyszczenia Światłem (*The First World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness*) [26].

Od 1972 roku stała się możliwa ilościowa analiza emisji światła z miast (radiancji) na podstawie zdjęć satelitarnych wykonanych przez satelity DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*). Wspomniane wcześniej modele pozwalają na prognozowanie, jaka część światła, przechodzącego przez atmosferę, ucieka w kosmos, a jaka jest zwracana w kierunku Ziemi. Zdjęcia DMSP posłużyły do weryfikacji poprawności tych modeli [27, 28]. W 2001 roku, wykorzystując modele Treanora i Garstanga oraz określając wielkość emisji światła przez miasta na podstawie zdjęć DMSP, stworzono wspomniany powyżej, powszechnie wykorzystywany przy opisie zanieczyszczenia świetlnego, atlas pokazujący modelowy rozkład jasności nocnego, bezchmurnego nieba, obserwowanego z powierzchni Ziemi [26]. Jednak, w związku z tym, że celem satelitów DMSP było prognozowanie pogody, ich kamery nie miały wystarczającej rozdzielczości, aby ukazać strukturę subtelną naziemnych źródeł światła, które w atlasie „zlewają się” w duże, jasne plamy.

W 2011 roku Amerykańska Narodowa Służba Oceaniczna i Meteorologiczna (NOAA) wystrzeliła satelitę Suomi NPP [29]. Na pokładzie satelity zamontowano kamerę VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), wyposażoną w najlepsze – jak dotąd w misjach cywilnych – czujniki i układy optyczne. O ile w przypadku satelitów DMSP najmniejsze dostrzegalne obiekty miały rozmiar 3 km, to na zdjęciach VIIRS można dostrzec obiekty o rozmiarach mniejszych od 1 km [30]. Na podstawowe znaczenie danych VIIRS, w szczególności zdjęć wykonanych w kanale DNB (Day/Night Band). Pozwalają one na określenie natężenia odbitego od powierzchni Ziemi promieniowania elektromagnetycznego o długości fali 0,7  $\mu\text{m}$ . Na znaczenie tych zdjęć do mapowania nocnego oświetlenia powierzchni Ziemi, zwłaszcza w stosunku do dawniejszych danych DSMP, zwrócono uwagę w 2013 roku [31]. Dane VIIRS posłużyły również do stworzenia modelu sztucznej poświaty niebieskiej [32] oraz nowego atlasu jasności nocnego nieba [33].

W 2018 roku na orbitę wystrzelono satelitę Luoja 1-01 CubeSat (6U), zbudowanego przez Uniwersytet Wuhan (Chiny). Jest to pierwszy satelita dedykowany obserwacjom nocnych źródeł światła na powierzchni Ziemi. Satelita ten dostarcza obrazy o rozdzielczości przestrzennej 130 m, czyli znacznie lepszej zarówno od DMSP/OLS, jak też Suomi-NPP/VIRS [34]. Stwarza to nowe perspektywy dla teledetekcji światła nocnych [35].

Dodatkowo, do analizy wpływu poszczególnych rodzajów oświetlenia miejskiego, można wykorzystać wysokorozdzielcze zdjęcia niektórych miast wykonane z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS). Tego rodzaju zdjęcie Krakowa zostało również wykonane 28 marca 2017 (rys. 1). Można na nim wyróżnić wszystkie rodzaje ciągów komunikacyjnych, jak również, na podstawie różnic w ich kolorach, wydzielić części miasta, w których oświetlenie metalohalogenkowe lub wysokoprężne sodowe (HPSL) zostało zastąpione przez oświetlenie typu LED<sup>4</sup>.



**Rys. 1.** Nocna fotografia śródmieścia Krakowa wykonana z Międzynarodowej Stacji Kosmicznej 28 marca 2017 (północ u góry)  
*Źródło: <http://eol.jsc.nasa.gov/>*

---

<sup>4</sup> Identyfikacja ta została potwierdzona w trakcie przeprowadzonych obserwacji terenowych.

Jedną z pierwszych analiz wkładu poszczególnych rodzajów oświetlenia miejskiego do całkowitej radiancji miejscowości było oszacowanie tej wielkości dla miasta Flagstaff (Arizona, USA) w 2009 roku [36]. Stwierdzono, że około 8,3% światła miejskiego „ucieka” w przestrzeń kosmiczną, z czego, z kolei, 33% pochodzi z oświetlenia obiektów sportowych. Po wyłączeniu tego rodzaju oświetlenia, oświetlenie komercyjne i przemysłowe stanowiło 62%, natomiast oświetlenie mieszkaniowe 14%, a drogowe 12%.

Potencjalnie najpełniejsze dane na temat udziału poszczególnych rodzajów źródeł światła sztucznego na poziom zanieczyszczenia świetlnego można byłoby uzyskać wyłączając je kolejno i analizując wpływ tej czynności na jasność tony świetlnej nocnego nieba. Jak dotąd, wyłączenia oświetlenia miejskiego były krótkotrwałe, najczęściej związane z awariami oświetlenia na ograniczonym obszarze, najczęściej niewielkiej części miasta. Niemniej jednak, zdarzenia tego typu zawsze były okazją do przeprowadzenia badań wpływu tego rodzaju oświetlenia na jasność tony świetlnej. Jedno z pierwszych takich badań zostało przeprowadzone 28 września 2006 roku w Reykjavíku (Islandia), gdzie wszystkie lampy miejskie były wyłączone od 22:20 do 22:40 w związku z przygotowaniem do Międzynarodowego Festiwalu Filmowego [37]. Stwierdzono jedynie, że oświetlenie uliczne znacząco przyczynia się do zanieczyszczenia światłem nocnego nieba.

Innym przykładem może być awaria zasilania w części Krakowa późnym wieczorem 25 sierpnia 2011 roku [38]. Podczas awarii na ponad dwie godziny pozbawiony został jakiegokolwiek zasilania (zarówno mieszkańców, jak również oświetlenia ulicznego) zwarty obszar o powierzchni 2 km<sup>2</sup> i populacji około 50 tys. Po usunięciu awarii, przy praktycznie bezchmurnym niebie, zmierzona w pobliżu centrum tego obszaru zenitalna jasność powierzchniowa nieba wynosiła 17,51 mag/arcsec<sup>2</sup> (10,79 mcd/m<sup>2</sup>). W czasie trwania awarii ta sama wielkość wynosiła 18,07 mag/arcsec<sup>2</sup> (6,44 mcd/m<sup>2</sup>). W trakcie usuwania awarii przez około pół godziny pozbawione energii elektrycznej były jedynie najbliższe okolice miejsca pomiarowego o powierzchni około 0,03 km<sup>2</sup>. Zmierzona wtedy zenitalna jasność powierzchniowa nieba wynosiła 17,72 mag/arcsec<sup>2</sup> (8,90 mcd/m<sup>2</sup>). Pomiar wykonywane w czasie trwania zjawiska pozwoliły na analizę wpływu lokalnego oświetlenia na sztuczną poświatę niebieską całego miasta. Stwierdzono, że całkowite wyłączenie oświetlenia na badanym obszarze, stanowiącym zaledwie 4% powierzchni miasta, powoduje zmniejszenie zenitalnej jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba, o 40%.

W 2016 roku, wykorzystując automatyczne, regularne, wyłączania oświetlenia ozdobnego w miejscowości Balaguer oraz wszystkich lamp publicznych w miejscowości Àger (obydwie w pobliżu Parku Astronomicznego Montsec w Hiszpanii), przeprowadzono różnicowe pomiary fotometryczne zmian jasności nocnego nieba oraz luminancji [39]. Stwierdzono, że przy bezchmurnym niebie oświetlenie ozdobne w Balaguer odpowiada za ponad 20% jasności nieba w zenicie, podczas gdy w pobliżu Àger stwierdzono jedynie bardzo małe zmiany w oświetleniu powierzchni ziemi w pochmurną noc. Podobne pomiary, jednak w znacznie mniejszej skali, przeprowadzono w parku miejskim Tiergarten w Berlinie (Niemcy) podczas Godziny dla Ziemi

w 2018 roku [40]. Stwierdzono, że wyłączenie pobliskiego oświetlenia Potsdamer Platz spowodowało spadek wartości luminancji skalarnej o 15%, zmniejszenie luminancji poziomej o 11% i zmniejszenie luminancji zenitalnej o 8%.

W 2019 roku w Tucson (USA, Arizona) przeprowadzono eksperyment, którego celem było uzyskanie informacji, jaka część emisji światła pochodzi z oświetlenia ulic, a jaka z oświetlenia prywatnych posesji. Dodatkowo oszacowano związane z tym zużycie energii. Natężenie oświetlenia ulicznego było celowo zmieniane przez 10 dni i w tym czasie badano zmianę radiancji satelitarnej. Stwierdzono, że komunalne oświetlenie uliczne odpowiada tylko za 13% całkowitej radiancji emitowanej z obszaru Tucson po północy [41]. Gdy oświetlenie to nie było wyłączone, jego wkład do całkowitej radiancji określono na 18%. Gdy wzięto pod uwagę oświetlenie uliczne obsługiwane przez innych dostawców, wielkości te wzrosły odpowiednio do 16% i 21%. Jednoczesne pomiary jasności zenitalnej nieba w tym czasie, gdy moc przypadająca na oświetlenie uliczne zmniejszała się od 90% przed północą do 30% po północy, wykazały, że jasność ta zmniejszyła się o 5,4% w pobliżu centrum miasta i 3,6% w sąsiedniej, podmiejskiej lokalizacji [42].

Stworzony model rozkładu źródeł światła, zakładający, że 26% stanowią lampy uliczne a 74% inne źródła sugeruje, że lampy uliczne wnoszą około 14% do emisji światła w niebo, powodującą powstawanie łuny świetlnej nad miastem. Bezpośrednie pomiary sugerowały jednak, że wkład oświetlenia ulicznego do zenitalnej jasności nieba stanowi jedynie 2–3% [43]. Różnicę między wartościami modelowanymi, a wyznaczonymi eksperymentalnie tłumaczono niedoszacowaniem całkowitej emisji światła w mieście, nieuwzględniającym zmieniających się ilością źródeł światła, emitujących światło horyzontalnie, takich jak oświetlenie wewnętrzne lokali mieszkalnych i innych, wydostające się przez odsonięte okna budynków, światła samochodowe czy podświetlane znaki drogowe i reklamy. Różnica ta może być również związana z poziomem zanieczyszczenia powietrza na badanych terenach pyłami zawieszonymi [44, 45].

Ogłoszenie stanu pandemii COVID-19 w 2020 roku spowodowało wzrost obciążenia opieki zdrowotnej, zmniejszenie mobilności ludności i związany z tym upadek turystyki, jak również różnego rodzaju nieoczekiwane efekty w środowisku przyrodniczym [46]. W wyniku ograniczenia transportu, jak też działalności przemysłowej, ogólna emisja dwutlenku węgla zmalała [47]. W wielu miastach na całym świecie zauważono również poprawę jakości powietrza i zmniejszenie zanieczyszczenia wody [48]. Efekt pandemii był również widoczny poprzez redukcję antropogenicznego hałasu sejsmicznego (drgan powierzchni Ziemi) pochodzącego z ruchu pociągów, samolotów, procesów przemysłowych itp. [49].

Oczywiście, wprowadzone lockdowny skłoniły wielu badaczy zanieczyszczenia światłem do zbadania zmian, jakie spowodowały one w jasności łun świetlnych. Skutki zmniejszenia emisji światła w mieście zostały opisane dla Granady (Hiszpania) [44]. W badaniach uwzględniono zarówno pomiary naziemne, jak też dane satelitarne. Pomiary prowadzone od 14 marca do 31 maja 2020 roku wykazały wyraźne zmniejszenie zanieczyszczenia światłem związane zarówno ze zmniejszeniem emisji

światła z obszaru miasta, jak też ze zmniejszeniem zawartości aerozoli antropogenicznych w atmosferze, które są źródłem rozproszenia światła. Stwierdzono wyraźną korelację między poziomem zanieczyszczenia atmosfery pyłem zawieszonym PM10 a mierzoną jasnością nieba – wraz ze wzrostem zanieczyszczenia atmosfery, rośnie jasność nocnego nieba w mieście. Pomiary naziemne wykazały niewielkie zmiany jasności nocnego nieba w drugiej połowie roku w porównaniu do pierwszej połowy. Jednocześnie, zdjęcia satelitarne nie wykazały znaczących zmian całkowitej radiancji w czasie lockdownu. Zważywszy na to, że aktywność zewnętrzna ludności zmniejszyła się w tym czasie nawet o 90% może to oznaczać, że radiancja miasta jest zdominowana przez oświetlenie stałe, które nie zmienia się w zależności od aktywności jego mieszkańców.

Fotometryczne mapowanie sztucznej poświaty niebieskiej dużego miasta i jego otoczenia zostało również wykonane w Berlinie, zarówno w przypadku bezchmurnego, jak i całkowicie zachmurzonego nieba [45]. Stwierdzono, że w czasie lockdownu jasność nieba w zenicie zmniejszyła się o 20% w centrum miasta i o ponad 50% w odległości 58 km od niego. Jednocześnie, na podstawie danych satelitarnych, stwierdzono, że radiancja z tego obszaru wzrosła. Sugerowano, że główną przyczyną redukcji jasności sztucznej poświaty niebieskiej jest poprawa jakości powietrza ze względu na zmniejszenie ruchu lotniczego i drogowego.

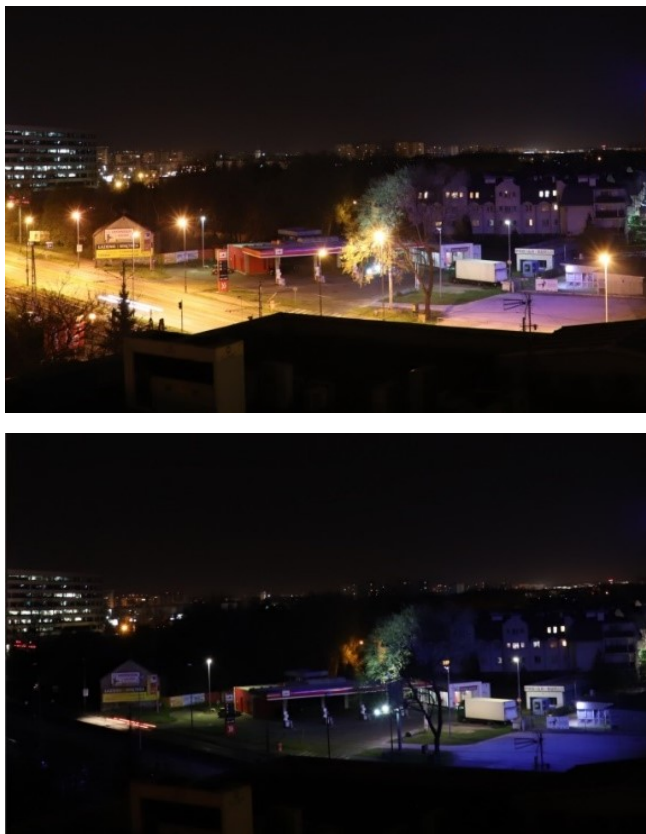
Podobną analizę dla kilku gmin województwa małopolskiego przeprowadził autor niniejszej pracy [50]. Celem analizy było zbadanie wpływu wyłączenia oświetlenia ulicznego na radiancję świetlną emitowaną z danego obszaru przy różnym stopniu jego urbanizacji. Stwierdzono, że w przypadku gmin słabo zurbanizowanych zmiany radiancji są spowodowane wyłącznie wyłączeniem oświetlenia ulicznego na terenach wiejskich, podczas gdy w przypadku gmin zurbanizowanych są one spowodowane przede wszystkim przez wyłączenia oświetlenia miejskiego. Stwierdzono również, że za redukcję radiancji odpowiada głównie wyłączenie oświetlenia dróg lokalnych, być może w związku z gorszą jakością opraw lamp na tych ulicach.

W kwietniu 2020 roku i w kolejnych miesiącach władze Krakowa, jak również kilku innych gmin w województwie małopolskim, uchwaliły całkowite lub częściowe wyłączenie oświetlenia ulicznego w godzinach nocnych, począwszy od północy (bądź od 1:00 CEST) do świtu (rys. 2)<sup>5</sup>. Stworzyło to unikalną możliwość zbadania udziału tego rodzaju oświetlenia zarówno w radiancji całego miasta (zwłaszcza, że zdjęcia VIIRS/DNB badanego obszaru są wykonywane już po godzinie 1:00 CEST, czyli po wyłączeniu oświetlenia ulicznego), jak również do pomiarów zmian jasności powierzchniowej tony świetlnej nocnego nieba. Do pomiarów tych wykorzystano zarówno sieć automatycznych stacji pomiarowych LPML, jak również pomiary wykonywane indywidualnie w czasie wyłączenia oświetlenia. Analiza obu tych danych jest przedmiotem niniejszej pracy.

---

<sup>5</sup> Interesujący film pokazujący wyłączenie oświetlenia ulicznego w kilku miejscach w Krakowie: <https://www.youtube.com/watch?v=W8Vo302EKJE>





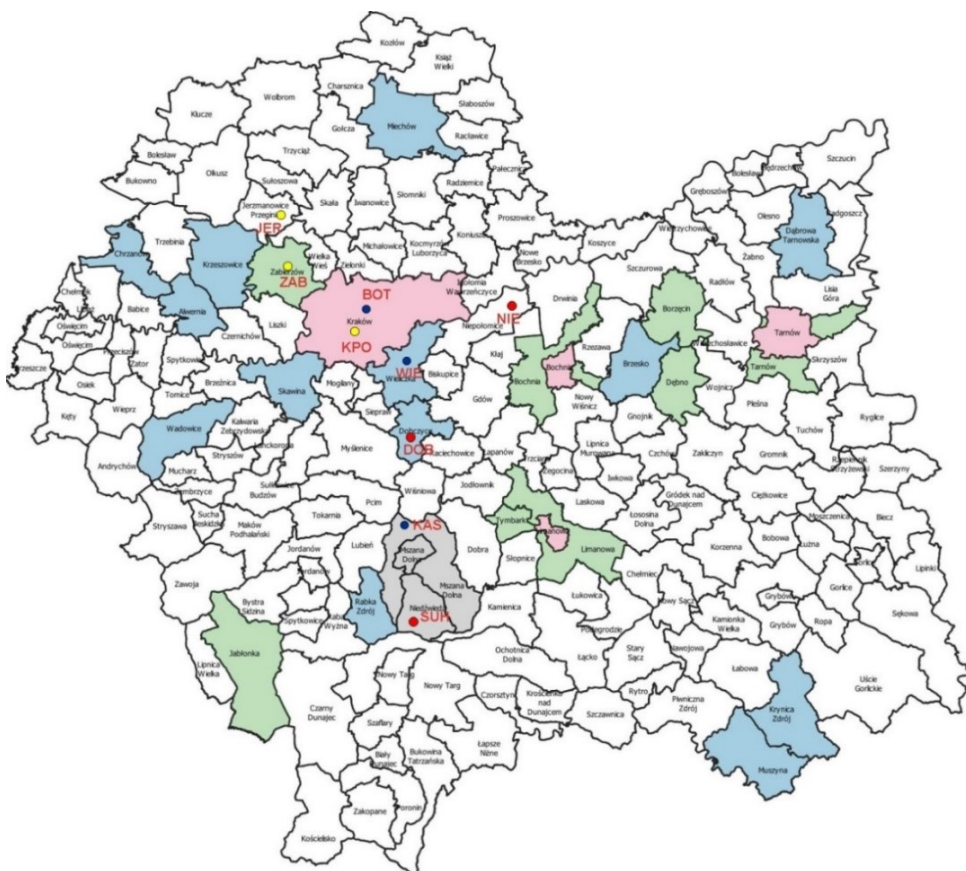
**Rys. 2.** Wyłączenie oświetlenia ulicznego w Krakowie. Zdjęcia wykonano przy tych samych ustawieniach aparatu Canon EOS 800D (ISO 1600, F 5.6, 1 s) 15 minut przed północą (po lewej) i 11 minut po północy (po prawej) w nocy z 17 na 18 kwietnia 2020 roku. Jedynymi nadal aktywnymi źródłami światła pozostał szklany biurowiec (po lewej), okna mieszkań i część lamp osiedlowych (w oddali)

*Źródło: fotografie własne.*

## 2. Obszar badań

Badania były prowadzone na obszarze województwa małopolskiego (rys. 3). W skład województwa małopolskiego wchodzi 182 gminy, w tym 14 gmin miejskich (również miasto Kraków, stanowiące odrębną gminę), 48 gmin miejsko-wiejskich i 120 gmin wiejskich [51]. Spośród tych gmin przeanalizowano informacje dotyczące wyłączania oświetlenia w Krakowie i innych miejscowościach województwa małopolskiego. Na podstawie analizy comiesięcznych uśrednionych zdjęć VIIRS/DNB wytypowano 22 miejscowości, w których stwierdzono wyraźne zmniejszenie radiancji w niektórych miesiącach 2020 roku.

Analiza doniesień medialnych, jak też informacje otrzymane od lokalnych władz badanych miejscowości pozwoliły potwierdzić, że w przypadku 21 miejscowości województwa małopolskiego w 2020 roku, w związku z pandemią COVID-19, rzeczywiście wyłączane było oświetlenie komunalne na okres przynajmniej jednego miesiąca. Są to: Alwernia, Bochnia, Borzęcin, Brzesko, Chrzanów, Dąbrowa Tarnowska, Dębno, Dobczyce, Jabłonka, Kraków, Krynica-Zdrój, Krzeszowice, Limanowa, Muszyna, Rabka-Zdrój, Skawina, Tarnów, Tymbark, Wadowice, Wieliczka i Zabierzów (rys. 3).



**Rys. 3.** Województwo małopolskie z podziałem na gminy. Zaznaczono gminy, w których w 2020 r. wyłączano oświetlenie komunalne (czerwone: gminy miejskie; niebieskie: gminy miejsko-wiejskie; zielone: gminy wiejskie). Zaznaczono również gminy Mszana Dolna i Niedźwiedź (jasno szare), w których w czasie badań wykonywano kontrolne pomiary jasności nocnego nieba. Opisane punkty wskazują położenie mierników SQM, wykonujących pomiary jasności nocnego nieba (czerwone: SQM-LE, niebieskie: SQM-LU-DL, żółte: SQM-L)

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1.

Spośród wybranych cztery miejscowości są siedzibami gmin miejskich (Bochnia, Kraków, Limanowa, Tarnów), osiem gmin wiejskich (Bochnia, Borzęcin, Dębno, Jabłonka, Limanowa, Tarnów, Tymbark, Zabierzów), pozostałe są siedzibami gmin miejsko-wiejskich o różnym stopniu urbanizacji. W części z podanych miejscowości, w związku z koniecznością oszczędzania energii elektrycznej, nie przywrócono pełnego oświetlenia komunalnego aż do momentu pisania niniejszej pracy.

## 2.1. Źródła zanieczyszczenia świetlnego

Jak wykazała analiza zdjęć VIIRS/DNB wykonanych w marcu 2020 roku, to, które źródła światła są jednocześnie źródłami zanieczyszczenia świetlnego, zależy od charakteru badanej gminy:

- w przypadku gmin miejskich najwięcej światła jest emitowane w przestrzeń z centrów miast (np. Bochnia, Limanowa), pozamiejskich centrów ekonomicznych i magazynów (np. Bochnia, Limanowa), z dworców kolejowych (np. Dworzec Główny w Krakowie), osiedli mieszkaniowych i kampusów akademickich (np. kampus AGH w Krakowie), czy niektórych zakładów przemysłowych (np. huta ArcelorMittal w Krakowie czy przedsiębiorstwo Grupa Azoty w Tarnowie).
- w przypadku gmin miejsko-wiejskich najwięcej światła jest emitowane w przestrzeń z centrów miast (w każdym przypadku), podmiejskich magazynów różnego rodzaju firm (Alwernia, Skawina, Wieliczka), miejskich i pozamiejskich zakładów przemysłowych (Brzesko, Chrzanów, Skawina, Tarnów), kamieniołomów (Krzeszowice), ośrodków letniskowych (Krynica-Zdrój, Muszyna, Rabka-Zdrój), węzłów komunikacyjnych (Rabka-Zdrój), elektrociepłowni (Skawina).
- w przypadku gmin wiejskich głównymi emiterami światła są, przede wszystkim, miejscowości będące siedzibami gmin, poza tym, zlokalizowane najczęściej w pobliżu, zakłady przemysłowe i magazyny (Bochnia, Borzęcin, Jabłonka, Limanowa, Tarnów, Tymbark), arterie komunikacyjne (Dębno), centra handlowe (Limanowa), zespoły szklarni (Zabierzów), lotniska (Zabierzów).

Należy zauważyć, że zdjęcia VIIRS/DNB wykonywane są około godziny 1:00 czasu lokalnego, gdy nie jest już aktywne oświetlenie mieszkaniowe. Oznacza to, że głównymi emiterami światła w tym czasie jest oświetlenie przemysłowe, reklamowe oraz traktów komunikacyjnych, zarówno pieszych, jak też drogowych i kolejowych, co wykazano w pracy [50].

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu wyłączenia oświetlenia komunalnego na wielkość zanieczyszczenia świetlnego. Często wyłączenie to dotyczyło tylko miejscowości, będących siedzibami gmin, ponadto, nie dotyczyło ono różnego rodzaju

zakładów przemysłowych, magazynów, szklarni itp., znajdujących się na terenie gminy. W związku z powyższym, w dalszej analizie ograniczono się wyłącznie do analizy emisji światła z obszarów miejscowości, będących siedzibami gmin (tabela 3)<sup>6</sup>.

## 2.2. Wyłączenia oświetlenia ulicznego

W kwietniu 2020 roku władze miasta Krakowa, stolicy województwa małopolskiego, podjęły decyzję o wyłączeniu oświetlenia ulicznego w porze nocnej na obszarze całego miasta. Decyzja ta była podjęta w związku ze zmniejszeniem się ruchu ulicznego przy narastającej pandemii COVID-19. W ślad za Krakowem również władze innych gmin województwa małopolskiego podjęły, w różnym zakresie, podobną decyzję.

Wyłączenia oświetlenia następowały automatycznie o wyznaczonych godzinach (najczęściej o północy czasu urzędowego). Proces ten był sterowany przez zegary umieszczone w szafach sterujących oświetleniem w różnych strefach oświetleniowych. W związku z niedokładną synchronizacją czasową poszczególnych zegarów, momenty wyłączania oświetlenia w różnych obszarach danej gminy mogły się różnić nawet o 10 minut (co rzeczywiście zaobserwowano np. w Krakowie; tabela 1).

Tabela 1. Miejscowości małopolskie, w których w 2020 r. wyłączano oświetlenie komunalne

Gmina	data (2020 rok)		Źródło danych
	początek	koniec	
Alwernia	listopad	do dzisiaj	UG
Bochnia	początek maja	1 września	prasa codzienna
Borzęcin	1 maja	do dzisiaj	UG
Brzesko	koniec kwietnia	30 czerwca	UG
Chrzanów	25 czerwca	wrzesień	UMiG
Dąbrowa Tarnowska	1 czerwca	grudzień (?)	prasa codzienna
Dębno	11 maja	do dzisiaj	UG
Dobczyce	20 maja	do dzisiaj	UMiG
Jabłonka	początek maja	koniec sierpnia	UG
Kraków	15 kwietnia	1 czerwca	UM
Krynica-Zdrój	poł. kwietnia	?	VIIRS/DNB
Krzyszowice	23 kwietnia	lipiec	UMiG
Limanowa	15 maja	31 sierpnia 2021	UM, UG
Muszyna	poł. kwietnia	lipiec	UMiG
Rabka-Zdrój	14 maja	12 czerwca	UM
Skawina	13 kwietnia–18 maja	1–14 września	UMiG

<sup>6</sup> Z tego powodu nie jest rozpatrywany przypadek gminy Miechów, w której wyłączane na noc jest do dzisiaj jedynie oświetlenie gminne, natomiast w samym mieście działań takich nie podejmowano.

Tabela 1. (cd.)

Tarnów	18 kwietnia	25 września	UG
Tymbark	1 czerwca	do dzisiaj	UG
Wadowice	1 czerwca	połowa września	UM
Wieliczka	1 maja	1 września	UMiG
Zabierzów	1 czerwca	31 grudnia	UG

Znak „?” oznacza, że brak jest danych dotyczących przywrócenia (bądź nie) oświetlenia ulicznego w danej miejscowości

UG – Urząd Gminy, UM – Urząd Miasta, UMiG – Urząd Miasta i Gminy

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych podanych w ostatniej kolumnie.

Najszerzy zasięg miała akcja wyłączania oświetlenia miejskiego w Krakowie [50]. Już 8 kwietnia zostało całkowicie wyłączone oświetlenie w parkach. Od północy 15 kwietnia wyłączano całkowicie oświetlenie uliczne w granicach miasta, podległe Zarządowi Dróg Miasta Krakowa. Oświetlenie ulic wyłączano o północy i ponownie włączano o 4:00 CEST. Od 22 kwietnia zsynchronizowano oświetlenie parków z oświetleniem ulicznym. Od 19 maja przesunięto wyłączanie oświetlenia ulic w Krakowie na 1:00 CEST i stan ten utrzymywano aż do świtu. Od północy 1 czerwca przywrócono standardowe oświetlenie na obszarze miasta.

W porze wyłączania oświetlenia ulic w Krakowie jedynymi aktywnymi źródłami sztucznego oświetlenia były lampy znajdujące się na prywatnych posesjach, lampy podległe wspólnotom mieszkaniowym, jak też różnego rodzaju oświetlenie reklamowe (rys. 2). Pozostawiono również oświetlenie głównych, kluczowych skrzyżowań w mieście.

### 2.3. Stanowiska pomiarowe

Analizą objęto wszystkie gminy województwa małopolskiego. W części z nich (rys. 3, zaznaczone kolorami) w 2020 roku odnotowano wyłączenia oświetlenia ulicznego w ciągu nocy, najczęściej między północą a 4:00 CEST. Oświetlenie ulic sterowane jest za pomocą zegarów astronomicznych umieszczonych w każdej szafie sterującej oświetleniem na danym obszarze. Teoretycznie światło powinno zgasnąć w jednym czasie, jednak w każdym zegarze ustawiona jest minimalnie inna godzina (różnica kilku minut), co spowodowało, że praktycznie oświetlenie na terenie miasta wyłączało się sukcesywnie w ciągu kilku minut.

Część zegarów (np. w gminie Wieliczka) nie przestawiono z tzw. czasu zimowego (czyli Czasu Środkowoeuropejskiego Standardowego, CET) na Czas Środkowoeuropejski Letni (CEST), w efekcie na obszarach obsługiwanych przez nie oświetlenie wyłączane było o godzinie 1:00 CEST. Dla wszystkich miejscowości, będących siedzibami tych gmin, wykonano analizę radiancji na podstawie zdjęć VIIRS/DNB. W kilku przypadkach możliwe było też wykonanie pomiarów aparaturowych jasności nocnego nieba. Wykorzystano w tym celu istniejące stacje pomiarowe Pracowni Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego na Politechnice Krakowskiej, wyposażone

w automatyczne mierniki SQM-LE i SQM-LU-DL, jak też ręczne mierniki SQM-L. Niestety, warunki pandemii i związane z tym różnego rodzaju ograniczenia spowodowały, że dane te są niekiedy niekompletne. Przyczynami były bądź utrudnienia w przemieszczaniu się (pomiar ręczny miernikami SQM-L), bądź też trudności w dostępie do aparatury pomiarowej, co m.in. uniemożliwiło terminową wymianę wyczerpanych baterii (mierniki SQM-LU-DL). Ponadto, niespodziewane ogłoszenie ograniczeń pandemicznych spowodowało opóźnienie w uruchomieniu nowych bądź chwilowo wyłączonych stanowisk pomiarowych.

Pomiary miernikami SQM były wykonywane zarówno w miejscowościach, w których wyłączane było oświetlenie uliczne (Kraków, Wieliczka, Zabierzów, Dobczyce), w innych sąsiednich gminach (Jerzmanowice, Niepołomice) oraz na stanowiskach oddalonych od obszaru badań, traktowanych jako stanowiska kontrolne (Kasinka Mała, Mt. Suhora; tabela 2).

Tabela 2. Zestawienie stanowisk, na których w 2020 roku dokonywano pomiarów jasności powierzchniowej nocnego nieba

Kod	Miejscowość	Współrzędne geograficzne (lat N; long E; Alt)	Dane meteo.	Max. S <sub>a</sub>	Uwagi (daty dla 2020 r.)
BOT	Kraków	50,0639; 19,9592; 209	TAK	18,8	SQM-LU-DL, przerwa 5–25.05
DOB	Dobczyce	49,8714; 20,0731; 273	NIE	21,2	SQM-LE, pomiary od 5.05
JER	Jerzmanowice	50,2124; 19,7499; 442	NIE	20,6	SQM-L, wybrane noce do 1.05
KAS	Kasinka Mała	46,6917; 20,0386; 390	NIE	21,4	SQM-LU-DL, przerwa 23.02–12.04
KPO	Kraków	50,0397; 19,9264; 202	TAK	18,8	SQM-L, wybrane noce, do 25.05
KPO2	Kraków	50,0397; 19,9303; 202	TAK	18,8	SQM-L, wybrane noce, do 25.05
NIE	Niepołomice	50,0381; 20,2111; 196	TAK	20,3	SQM-LE, pomiary od 7.05
SUH	szczyt Suhora	49,5692; 20,0672; 1009	TAK	21,7	SQM-LE
WIE	Wieliczka	49,9903; 20,0711; 253	NIE	20,0	SQM-LU-DL, przerwa 2.03–9.04
ZAB	Zabierzów	50,1200; 19,7828; 238	TAK	20,2	SQM-L, wybrane noce, do 25.06

W kolumnie „Dane meteo.” zamieszczono informacje, czy dostępne były dane ze stacji meteorologicznych. Kolumna „Max. S<sub>a</sub>” podaje najwyższą zmierzoną wartość tej jasności (czyli przy najciemniejszym możliwym, bezchmurnym i bezksiężycowym niebie) [mag/arcsec<sup>2</sup>]

### 3. Metodologia pomiarów

#### 3.1. Stosowane jednostki

W opisie zjawiska zanieczyszczenia świetlnego wykorzystuje się szereg jednostek [52]. W niniejszej pracy wykorzystywane są dwie grupy jednostek.

##### 3.1.1. Jednostki radiometryczne

Radiometria jest działem fizyki i metrologii zajmującym się ilościowymi pomiarami promieniowania optycznego, czyli promieniowania elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości od  $3 \cdot 10^{11}$  and  $3 \cdot 10^{16}$  Hz. Jedyna rzeczywista różnica między radiometrią a fotometrią polega na tym, że radiometria obejmuje całe widmo promieniowania optycznego, podczas gdy fotometria ogranicza się do widma widzialnego w aspekcie wpływu na wrażenia wzrokowe w oku ludzkim (z uwzględnieniem czułości spektralnej oka) [52]. Z satelitarnych danych VIIRS/DNB otrzymuje się wartość radiancji, czyli strumienia promieniowania na jednostkę powierzchni na jednostkę kąta bryłowego. Symbolem radiancji jest L, natomiast standardową jednostką w układzie SI jest  $W/m^2 \cdot sr$  [52]. W niniejszej publikacji wartości radiancji podawane są w jednostkach pochodnych  $nW/cm^2 \cdot sr$ , w których podawane są dane VIIRS/DNB.

##### 3.1.2. Jednostki fotometryczne

Miarą wrażenia wzrokowego, które odbiera oko ze świecącej powierzchni, jest luminancja. W układzie SI wyrażana jest ona w jednostkach: kandela na metr kwadratowy ( $cd/m^2$ ).

Używane w opisywanych pomiarach mierniki typu Unihedron SQM podają wartość jasności powierzchniowej nocnego nieba (oznaczaną jako  $S_a$ ) w astronomicznych jednostkach magnitudo na sekundę łuku do kwadratu ( $mag/arcsec^2$ ). Skala ta określa jasność powierzchniową rozmytych obiektów astronomicznych, takich jak mgławice, galaktyki, komety, czy właśnie tło nieba. Używany w miernikach częstotliwościowy czujnik TSL237 ma wyjście częstotliwościowe proporcjonalne do mierzonej jasności z responsywnością 2,3 kHz ( $\mu W/cm^2$ ). Jednakże producent miernika nie udostępnia algorytmu używanego do przeliczenia skali czujnika ( $\mu W/cm^2$ ) na skale miernika ( $mag/arcsec^2$ ). Podane jest jedynie powiązanie jasności powierzchniowej ze skalą luminancji. Związek ten nie jest oczywisty, jednak zakładając liniową korelację między odbieraną przez oko jasnością powierzchniową (luminancją) a fizyczną jasnością powierzchniową, można otrzymać zależność [53–55]:

$$(mag/arcsec^2) = 12,59 - 2,5 \log[(cd/m^2)], \quad (1)$$

czyli,

$$[cd/m^2] = 10,8 \times 10^4 \times 10^{[-0,4(mag/arcsec^2)]}. \quad (2)$$

W związku z bardzo małą jasnością powierzchniową nocnego nieba, powszechnie używaną jednostką jest milikandela na metr kwadratowy ( $\text{mcd}/\text{m}^2$ ).

W niniejszej publikacji wyniki pomiarów SQM podawane są w jednostkach  $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ , jednak przy dokonywaniu analizy, w szczególności przy porównywaniu z danymi VIIRS/DNB, są one przeliczane na  $\text{mcd}/\text{m}^2$ .

### 3.2. Teledetekcja satelitarna

W celu określenia całkowitej radiancji z badanych obszarów wykorzystano zdjęcia pozyskane z satelity Suomi National Polar-orbiting Partnership (SNPP). Satelita ten został wystrzelony w 2011 r. przez Amerykańską Narodową Służbę Oceaniczną i Meteorologiczną (NOAA) [29]. Na pokładzie satelity zamontowano kamerę VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), wyposażoną w najlepsze jak dotąd w misjach cywilnych czujniki i układy optyczne. O ile w przypadku wcześniejszych satelitów DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) najmniejsze dostrzegalne obiekty miały rozmiar 3 km, to na zdjęciach VIIRS można dostrzec obiekty o rozmiarach mniejszych od 1 km.

Dla potrzeb niniejszej pracy użyteczne są zdjęcia wykonane w zakresie spektralnym DNB (*Day Night Band*) [31]. Środek tego pasma wypada na  $700 \mu\text{m}$ , ma ono szerokość  $400 \mu\text{m}$  przy rozdzielczości obrazowania  $0,8 \text{ km}$ . DNB stanowi, w pewnym sensie, osobny sensor w ramach VIIRS, ma oddzielne detektory, odmienny sposób obrazowania, ale przede wszystkim inną czułość. DNB działa w trzech trybach wzmocnienia sygnału. W DNB widać więc w nocy o wiele więcej niż w pozostałych „dziennych” kanałach. Surowe dane DNB wymagają starannej obróbki i uwzględnienia wielu czynników, takich jak m.in. chmury czy kąt wykonywana zdjęcia. W związku z tym w analizie wykorzystano dane wcześniej przetworzone.

W przypadku analizowania średnich miesięcznych wartości radiancji wykorzystano gotowe pliki w formacie GeoTIFF, otrzymane z Earth Observation Group [31, 56], w szczególności Monthly Cloud-free DNB Composites zawarte w plikach *vcmsl* (pliki te zawierają dane po korekcie na oświetlenie kamery satelity światłem bezpośrednim).

W celu wykonania analizy porównawczej wartości radiancji dla konkretnych nocy przed i po dacie rozpoczęcia wyłączenia oświetlenia w danej miejscowości, analizowano również dzienne obrazy VIIRS/DNB, pobrane z Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center przy Goddard Space Flight Center (LAADS DAAC) [59]. Pierwszy z dwóch pakietów VIIRS/DNB zawiera dobowe dane z nocnej radiancji (VIIRS/NPP Daily Gridded Day Night Band  $15 \text{ arc-second Linear Lat Lon Grid Night}$ ). Pakiet ten, o nazwie VNP46A1, zawiera 26 zestawów danych (*Science Data Sets, SDS*) obejmujących radiancję, kąty zenitalne i azymutalne, wskaźnik zachmurzenia, czas, radiancję w bliskiej podczerwieni, temperaturę jasnościową, wskaźnik jakości VIIRS, kąt fazowy Księżyca oraz procent oświetlenia jego tarczy. Podawane są również wskaźniki jakości (*Quality Flag, QF*),



informacje specyficzne dla zachmurzenia, pasma VIIRS o średniej rozdzielczości M10, M11, M12, M13, M15, M16, oraz to, co nas interesuje, czyli DNB. W okresie badawczym (kwiecień–czerwiec 2020) zdjęcia VIIRS/DNB badanego obszaru wykonywane były około godziny 0:10 UTC, czyli 2:10 CEST. W związku z tym, że zegary wyłączające oświetlenie ulic o północy działały w tym okresie w Polsce właśnie według CEST, zdjęcia VIIRS/DNB wykonywane były już w czasie, gdy oświetlenie to było wyłączone. Trzeba zauważyć, że dla szerokości geograficznych województwa małopolskiego brak jest danych dobowych z czerwca 2020, z okresu w pobliżu przesilenia letniego.

### 3.3. Nazemne pomiary jasności łuny świetlnej

Pomiary jasności powierzchniowej nocnego nieba (łuny świetlnej) wykonywane były przy użyciu mierników Sky Quality Meter (SQM) firmy Unihedron. Mierniki te podają mierzoną wielkość w powszechnie używanych w astronomii, jak też w ocenie jakości nocnego nieba, jednostkach jasności powierzchniowej: magnitudo na sekundę łuku do kwadratu – mag/arcsec<sup>2</sup>. Różnice między wartościami wyznaczonymi przez mierniki a używanym w astronomii standardem V będą zależą od rodzaju mierzonego źródła i dla obszaru zastosowań SQM mieszczą się w zakresie (SQM–V) od –0,13 do +0,11 mag/arcsec<sup>2</sup> [57, 58]. Dla nieba naturalnego i średnio zanieczyszczonego świetlnie należy przyjąć różnicę  $0,17 \pm 0,07$  mag/arcsec<sup>2</sup>. W niniejszej pracy analizowane są różnice, czyli wartości względne wskazań danego miernika, w związku z czym zarówno ta korekta, jak też wynikająca z zastosowanej szybki osłaniającej detektor ( $0,1$  mag/arcsec<sup>2</sup>) nie są uwzględniane.

Mierniki SQM produkowane są w kilku wersjach, z których w opisywanych badaniach wykorzystano: ręcznie wyzwalany SQM–L, sterowany komputerowo SQM–LE oraz autonomiczny SQM–LU–DL. Wszystkie te mierniki posiadają kąt zbierania światła wynoszący 20° od osi przyrządu. W czasie wykonywania pomiarów skierowane były w kierunku zenitu z dokładnością do około 3°. Dokładność pomiaru, podana przez producenta, wynosi  $0,1$  mag/arcsec<sup>2</sup>, jednak wielokrotne pomiary pozwoliły stwierdzić, że amplituda zmian wartości  $S_a$  w każdym badanym egzemplarzu miernika w stabilnych warunkach atmosferycznych nie przekracza  $0,02$  mag/arcsec<sup>2</sup>. W związku z tym w przypadku SQM–L pomiar wyzwalano dotąd, dopóki trzy kolejne odczyty nie były wzajemnie zgodne z dokładnością  $0,01$ – $0,02$  mag/arcsec<sup>2</sup> i w tym czasie nie obserwowano jakiegokolwiek trendu zmian. W efekcie przyjęto  $0,02$  mag/arcsec<sup>2</sup> jako wielkość błędu pomiarowego.

W przypadku mierników SQM–LE i SQM–LU–DL, na podstawie przebiegu krzywej zmian jasności w ciągu bezchmurnej i bezksiężycowej nocy, w analizie uwzględniano jedynie takie dane, gdy w okresie wyłączenia oświetlenia ulicznego zmiany  $S_a$  nie przekraczały  $0,03$  mag/arcsec<sup>2</sup> (taką też przyjęto wartość błędu pomiarowego dla tego rodzaju pomiarów).

### 3.4. Informacje o wyłączeniach oświetlenia ulicznego

Informacje o zasięgu przestrzennym i czasowym wyłączeń oświetlenia ulicznego w 2020 roku pozyskano z urzędów władz lokalnych, które podjęły te działania. Ponadto, wykorzystano też informacje pochodzące z lokalnej prasy oraz otrzymane od mieszkańców analizowanych gmin.

## 4. Wyniki pomiarów

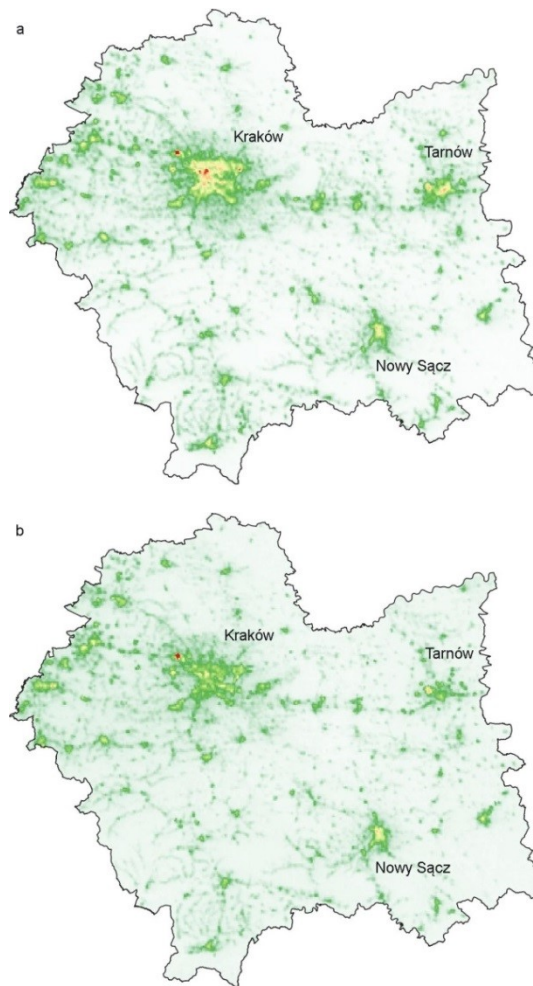
### 4.1. Teledetekcja

Wszystkie obrazy VIIRS/DNB prezentowane są w układzie współrzędnych EPSG:3857 – WGS 84/Spherical Mercator (Pseudo Mercator).

Wykorzystano średnie miesięczne wartości radiancji, otrzymane z danych VIIRS/DNB. Jako typową dla okresu tuż przed ogłoszeniem ograniczeń związanych z pandemią COVID-19, wybrano wartość radiancji w marcu 2020 roku (zrezygnowano z danych ze stycznia i lutego z powodu silnie zmiennych w tych miesiącach warunków atmosferycznych oraz zmiennej pokrywy śnieżnej).

W celu wybrania gmin, w których podejmowano akcję wyłączenia oświetlenia komunalnego, porównano obraz województwa małopolskiego VIIRS/DNB z marca 2020 roku z analogicznymi obrazami w kolejnych miesiącach 2020 roku. Przykładowo, na rysunku 4 prezentowane są obrazy Małopolski w marcu oraz w maju 2020 roku.

Na podstawie tej analizy wstępnie wytypowano 21 gmin, w których w różnych kolejnych miesiącach 2020 roku zauważono znaczące zmniejszenie radiancji w porównaniu do marca tego roku. Do władz wszystkich w ten sposób wytypowanych gmin wysłano zapytanie, czy rzeczywiście wyłączenia te miały miejsce, a jeśli tak, to proszono o podanie szczegółów tej akcji. Pozytywne odpowiedzi, zawierające daty i godziny włączania i wyłączania oświetlenia komunalnego, jak też zasięg terytorialny akcji, otrzymano z 12 gmin, w pozostałych przypadkach dane te odtworzono na podstawie informacji z prasy lokalnej bądź z udostępnianych publicznie w Internecie zarządzeń gminnych. Żadnego potwierdzenia nie udało się uzyskać jedynie dla dwóch gmin: Krynica-Zdrój i Muszyna, jednak w analizie zostały one uwzględnione, gdyż zmniejszenie radiancji na zdjęciach VIIRS/DNB w tych przypadkach jest wyraźne i nie może budzić wątpliwości.



**Rys. 4.** Radiancja z obszaru województwa małopolskiego w marcu (a) i w maju (b) 2020 r.  
Widoczne największe miasta regionu: Kraków, Tarnów i Nowy Sącz.  
W przypadku dwóch pierwszych widoczne zmniejszenie radiancji na skutek wyłączenia oświetlenia komunalnego w maju

*Źródło: opracowanie własne na podstawie zdjęć VIIRS/DNB.*

Zmiany radiancji części z wybranych gmin małopolskich były już wcześniej analizowane w innej publikacji [50]. W ramach tych badań stwierdzono, że często na wynik tych analiz wpływały źródła światła związane z zakładami przemysłowymi, magazynami, centrami handlowymi, szklarniami itp., zlokalizowanymi na obszarze gminy, najczęściej poza obszarami zwartej zabudowy. Źródła te, dające bardzo znaczący wkład do całkowitej radiancji z obszaru danej gminy, a nie podlegające władzom lokalnym, nie były wyłączone w ramach opisywanych akcji redukcji oświetlenia komunalnego. W efekcie, wnioski ilościowe, wyciągnięte z tego typu

analiz mogą nie być niekiedy w pełni prawidłowe. W celu uniknięcia tego efektu, w niniejszej analizie ograniczono się do pomiaru radiancji wyłącznie z obszaru miejscowości, będących siedzibami władz gminnych. W tabeli 3 zebrano średnie miesięczne wartości radiancji otrzymane z analizy obrazów VIIRS/DNB dla 20 wytypowanych miejscowości województwa małopolskiego w marcu oraz w miesiącu, w którym wyłączona była największa liczba oświetlenia komunalnego (proces zarówno wyłączania, jak i ponownego włączania tego oświetlenia trwał niekiedy nawet kilkanaście dni). Podano również populację tych miejscowości oraz powierzchnię obszaru objętego analizą.

Tabela 3. Zestawienie pomiarów radiancji w wytypowanych miejscowościach gminnych województwa małopolskiego w marcu 2020 r. Krynica-Zdrój i Muszyna, dla których nie otrzymano potwierdzenia wyłączania oświetlenia komunalnego, zostały oznaczone kursywą

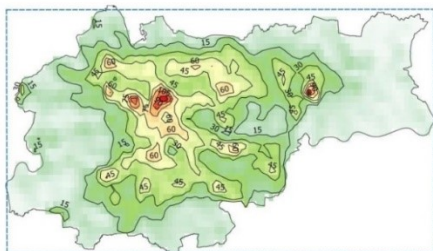
Miejscowość	Powierzchnia obszaru pomiaru [km <sup>2</sup> ]	Populacja miejscowości	Radiancja w marcu 2020 [nW/cm <sup>2</sup> ·sr]	Minimalna radiancja w 2020 (miesiąc) [nW/cm <sup>2</sup> ·sr]
Alwernia	19,64	3380	609	217 (12)
Bochnia	20,55	29992	1856	584 (06)
Borzęcin	3,37	3865	109	33 (05)
Brzesko	9,92	16827	1085	559 (06)
Chrzanów	20,61	37123	1913	656 (08)
Dąbrowa Tarnowska	8,35	11924	602	195 (08)
Dębno	2,80	1601	126	25 (10)
Dobczyce	12,45	6425	518	360 (10)
Jabłonka	18,74	4767	412	247 (07)
Kraków	520,98	766683	51472	26311 (05)
<i>Krynica-Zdrój*</i>	<i>28,00</i>	<i>11243</i>	<i>1101</i>	<i>539 (11)</i>
Krzeszowice	7,88	10090	600	317 (06)
Limanowa	10,62	15132	855	280 (06)
<i>Muszyna*</i>	<i>8,08</i>	<i>4909</i>	<i>412</i>	<i>161 (05)</i>
Rabka-Zdrój	6,75	13052	438	143 (05)
Skawina	5,43	24325	669	332 (06)
Tarnów	32,55	107045	5647	2098 (05)
Tymbark	5,04	2700	235	123 (10)
Wadowice	2,92	19149	479	297 (07)
Wieliczka	8,90	23395	1334	494 (07)
Zabierzów	3,93	4400	291	190 (08)

\* Krynica-Zdrój i Muszyna, dla których nie otrzymano potwierdzenia wyłączania oświetlenia komunalnego, zostały oznaczone kursywą.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z obrazów VIIRS/DNB.

Rysunki 5 i 6 pokazują zmiany radiancji w 2020 roku dla kilku przykładowych miejscowości województwa małopolskiego o różnej wielkości i populacji.

## Kraków

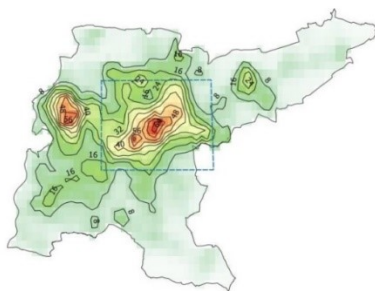


marzec 2020

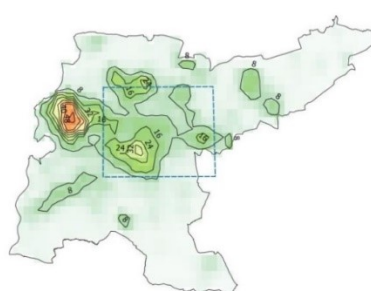


maj 2020

## Tarnów



marzec 2020



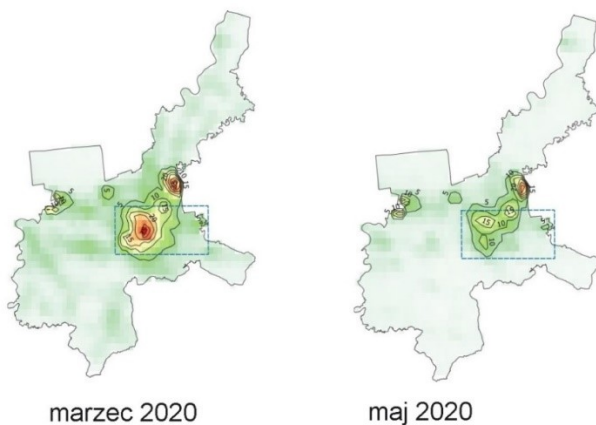
maj 2020

**Rys. 5.** Zmiany radiancji, wynikające z wyłączenia oświetlenia komunalnego w 2020 r., dla największych miast województwa małopolskiego: Krakowa i Tarnowa. Niebieskim czworo-kątem zaznaczono obszar, dla którego wykonano pomiary radiancji.

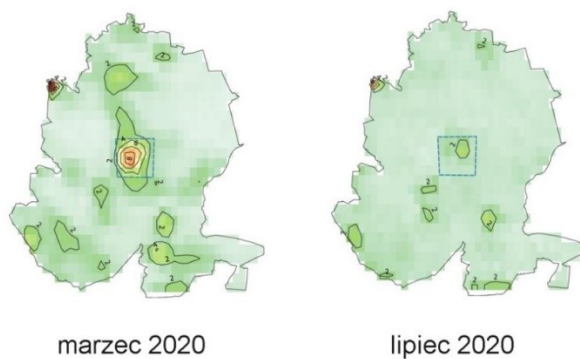
etykiety warstwic wyrażone są w  $nW/cm^2 \cdot sr$

Źródło: opracowanie własne na podstawie zdjęć VIIRS/DNB.

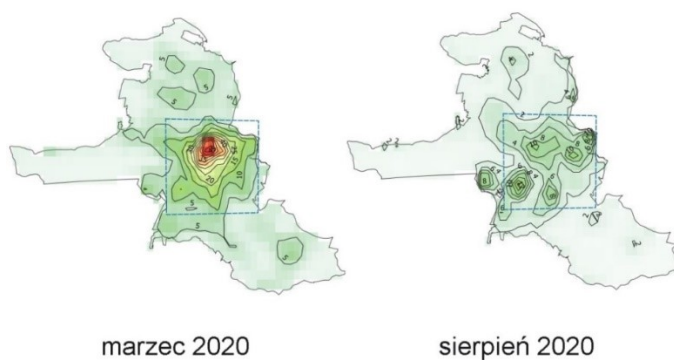
### Bochnia



### Borzęcin



### Chrzanów



**Rys. 6.** Zmiany radiancji, wynikające z wyłączenia oświetlenia komunalnego w 2020 r., dla kilku wybranych, mniejszych miejscowości województwa małopolskiego. Niebieskim czworokątem zaznaczono obszar, dla którego wykonano pomiary radiancji. Etykiety warstwicy wyrażone są w  $nW/cm^2 \cdot sr$

Źródło: opracowanie własne na podstawie zdjęć VIIRS/DNB.

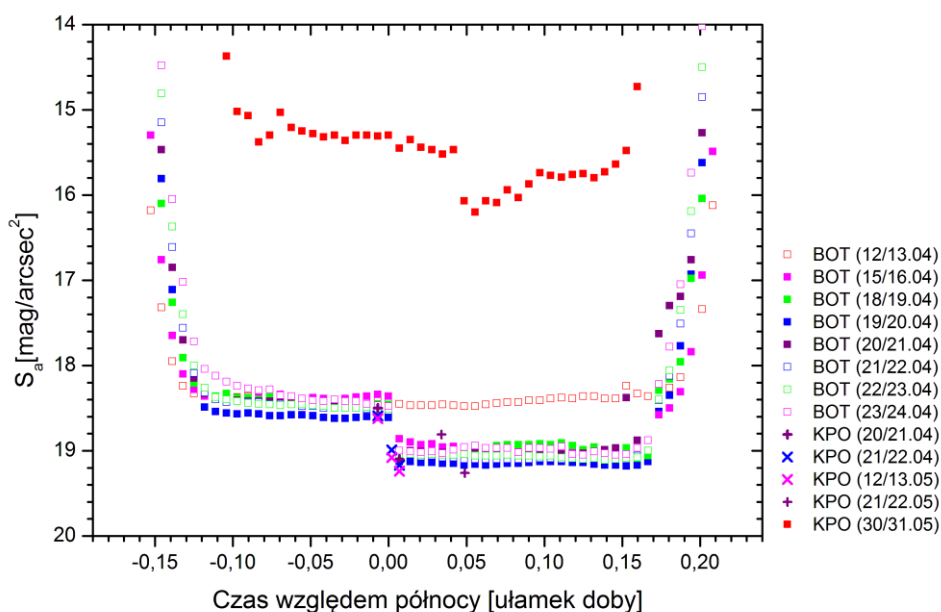
## 4.2. Pomiary zenitalnej jasności powierzchniowej nocnego nieba

### 4.2.1. Pomiary w bezchmurne i bezksiężycowe noce

Przy pomocy mierników SQM wykonano szereg pomiarów jasności nocnego nieba w warunkach bezchmurnej i bezksiężycowej nocy. Wyznaczono również zmiany średniej wartości  $S_a$  zmierzonej na stanowiskach pomiarowych w tych warunkach.

Na stanowiskach kontrolnych KAS i SUH w ciągu całego okresu pomiarowego nie stwierdzono zmian wartości  $S_a$ , które mogłyby być powiązane z wyłączeniami oświetlenia w Krakowie bądź w sąsiednich gminach. W przypadku stanowiska KAS w badanym okresie w bezchmurne i bezksiężycowe noce wartość  $S_a$  wynosiła:  $21,25 \pm 0,01$  mag/arcsec<sup>2</sup>, w przypadku stanowiska SUH:  $21,78 \pm 0,01$  mag/arcsec<sup>2</sup>.

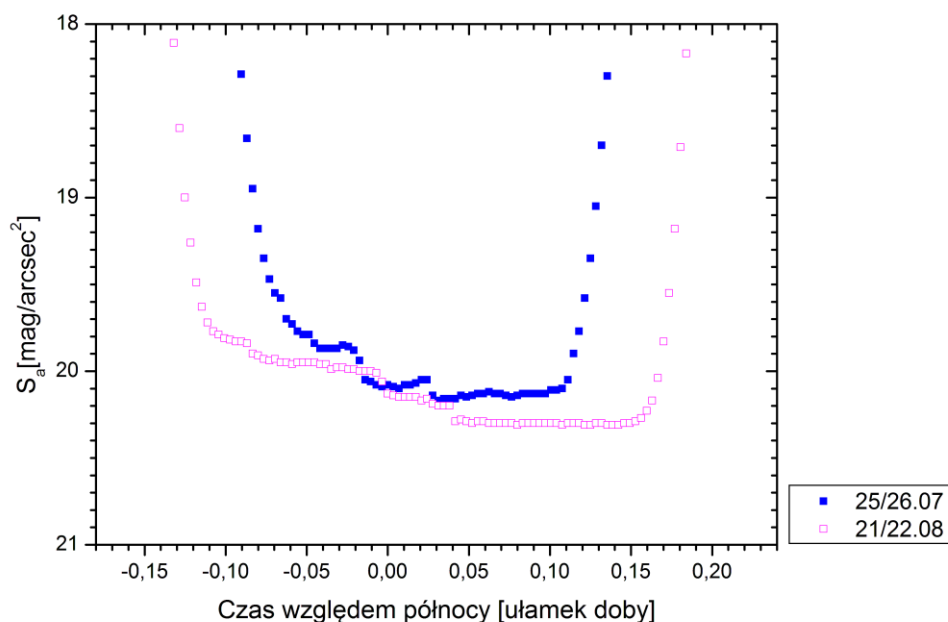
Najbardziej kompleksowe pomiary jasności nieba wykonano w Krakowie. Rysunek 7 przedstawia przykładowe zmiany wartości  $S_a$  w czasie wybranych bezchmurnych i bezksiężycowych nocy w Krakowie (SQM–LU–DL: BOT; SQM–L: KPO). Dla porównania pokazano również zmiany  $S_a$  w czasie nocy poprzedzającej okres wyłączania oświetlenia (12/13 kwietnia) oraz w czasie pełni Księżyca (30/31 maja).



**Rys. 7.** Przykładowe zmiany wartości  $S_a$  w czasie wybranych bezchmurnych i bezksiężycowych nocy w Krakowie (BOT: SQM–LU–DL; KPO: SQM–L). Początkowo wyłączenie oświetlenia nastąpiło o godzinie 0:00 CEST (0,00), począwszy od nocy 18/19 maja o 1:00 CEST (0,04). Dla porównania pokazano również zmiany  $S_a$  w czasie nocy poprzedzającej okres wyłączania oświetlenia (12/13 kwietnia) oraz w czasie pełni Księżyca (30/31 maja)

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

Rysunek 8 przedstawia analogiczne przykładowe pomiary wykonane w Wieliczce (stanowisko WIE). Widoczne jest dwuetapowe zmniejszanie jasności nocnego nieba związane z tym, że część zegarów astronomicznych, sterujących procesem wyłączenia oświetlenia ulicznego, nie była przestawiona na tzw. czas letni (CEST). Do analizy wybrano pomiary wykonane w lipcu i sierpniu 2020 roku, gdyż w tym okresie nie wyłączano już oświetlenia ulicznego w sąsiednim Krakowie, przez co jedynym źródłem zmian jasności bezchmurnego i bezksiężycowego nocnego nieba były wyłączenia oświetlenia w gminie Wieliczka.

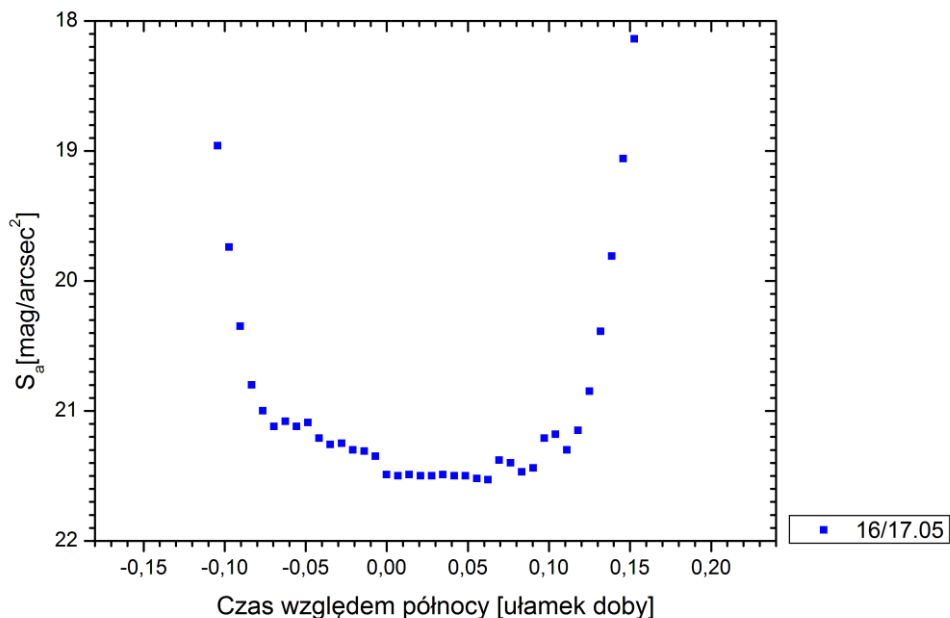


**Rys. 8.** Przykładowe zmiany wartości  $S_a$  w Wieliczce (stanowisko WIE) w lipcu i sierpniu 2020 r. Widoczne jest dwuetapowe zmniejszanie jasności nocnego nieba związane z tym, że część zegarów astronomicznych, sterujących procesem wyłączenia oświetlenia ulicznego, nie była przestawiona na tzw. czas letni (CEST)

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

Ostatnią z gmin, w których wyłączano oświetlenie komunalne, a jednocześnie prowadzone były ciągłe pomiary jasności nocnego nieba, były Dobczyce. Niestety, w związku z brakiem dostępu do czasowo uszkodzonego w czasie lockdownu komputera, a także częstym zachmurzeniem w rejonie dużego zbiornika wodnego (Zbiornik Dobczycki), można wskazać jedynie pojedynczą noc, w której wyraźnie widoczny jest efekt wyłączenia oświetlenia o północy (rys. 9).



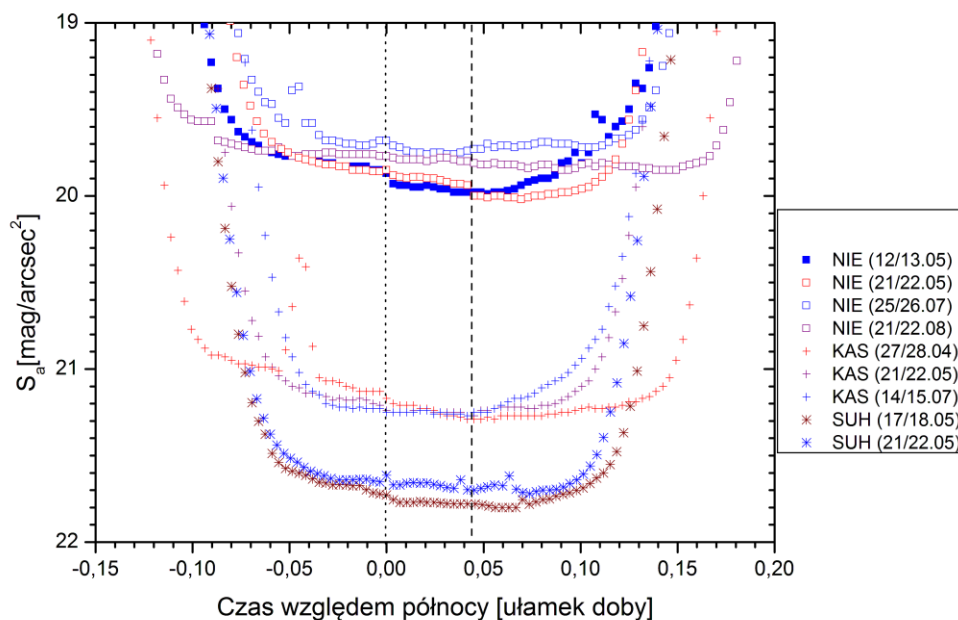


**Rys. 9.** Przykładowe zmiany wartości  $S_a$  w Dobczycach (stanowisko DOB) w nocy 16/17 maja 2020 roku

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

W Zabierzowie (stanowisko ZAB) wykonywano pomiary przy pomocy ręcznego miernika SQM–L, jednak tylko jeden pomiar spełniał podane wcześniej warunki (bezchmurne i bezksiężycowe niebo). W nocy 27/28 kwietnia pomiar wykonany o 23:51 CEST dał wartość  $S_a = 20,04$  mag/arcsec<sup>2</sup>, podczas gdy pomiar wykonany o 0:10 CEST dał wartość 20,19 mag/arcsec<sup>2</sup>.

Przeanalizowano również pomiary jasności nieba, wykonane w miejscowościach, w których nie wyłączano oświetlenia komunalnego. Niektóre z nich sąsiadowały z gminami, w których wyłączano oświetlenie nocne: Jerzmanowice (JER) z Zabierzowem (ZAB), Niepołomice (NIE) z Krakowem (BOT), inne (Kasinka – KAS, Suhora – SUH) oddalone były od takich ośrodków o kilkadziesiąt kilometrów. Zbiórny wykres zmian jasności w ciągu przykładowych nocy na tych stanowiskach zaprezentowany jest na rysunku 10.



**Rys. 10.** Przykładowe zmiany wartości  $S_a$  w Niepołomicach (NIE), Kasince Małej (KAS) i na szczycie Suhora (SUH) w 2020 r. Pionowe linie wyznaczają godzinę 0:00 CEST (lewa, punktowana) oraz 1:00 CEST (prawa, kreskowana)

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

#### 4.2.2. Pomiar w nocy zachmurzone

Pomiary prowadzono również w czasie nocy zachmurzonych. Jedynie na stanowiskach KPO, KPO2 odnotowywany był rodzaj chmur w momencie wykonywania pomiaru. Pomiar te podsumowane są w tabeli 4.

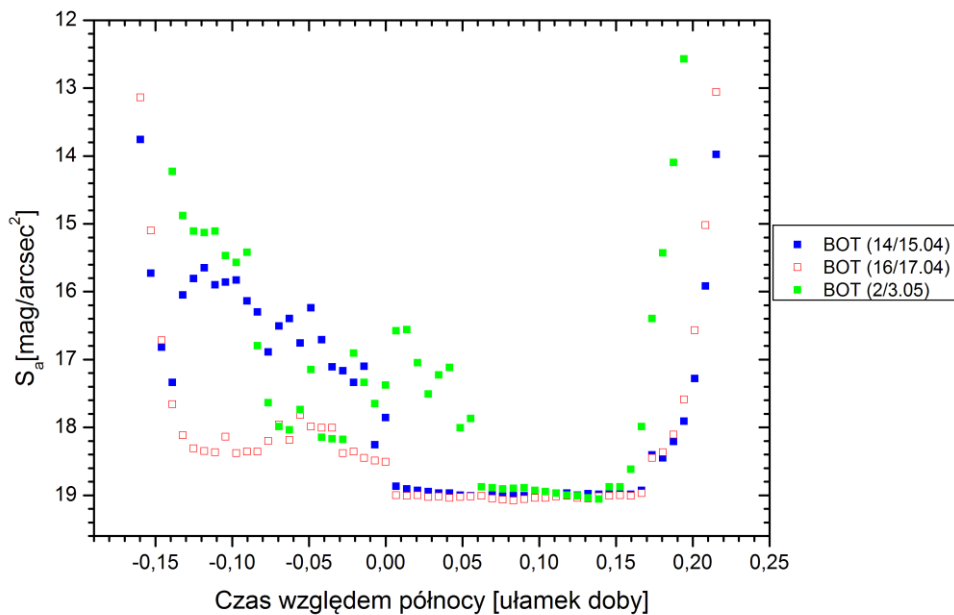
Tabela 4. Zmiany wartości  $S_a$  przy pełnym zachmurzeniu, zmierzone przy pomocy ręcznych mierników SQM–L na stanowiskach KPO i KPO2

Data	Stanowisko	Przed	Po	Podstawa chmur [m]
23/24.04	KPO	18,42	19,03	6000
23/24.04	KPO2	18,49	19,07	6000
24/25.04	KPO	15,53	16,20	1400
24/25.04	KPO2	15,57	16,22	1400
25/26.04	KPO	16,23	16,93	1829
25/26.04	KPO2	16,10	16,83	1829

Tabela 4. (cd.)

27/28.04	KPO	18,34	18,99	6000
27/28.04	KPO2	18,45	19,02	6000
29/30.04	KPO	15,60	16,10	300
29/30.04	KPO2	15,50	16,00	300
25/26.05	KPO	15,84	16,68	1463
25/26.05	KPO2	15,91	16,72	1463

Dodatkowo, na stanowisku BOT uzyskano dane meteorologiczne z działającej przy nim stacji meteorologicznej. Na rysunku 11 przedstawiono wyłącznie zmiany wartości  $S_a$  przy zachmurzeniu chmurami piętra średniego i wysokiego, gdyż tylko w tym przypadku widoczny jest efekt wyłączenia oświetlenia komunalnego.



**Rys. 11.** Przykładowe zmiany wartości  $S_a$  w czasie wybranych bezksiężycowych nocy w Krakowie, przy zachmurzeniu chmurami piętra wysokiego (BOT: SQM–LU–DL; KPO: SQM–L). Początkowo wyłączenie oświetlenia następowało o północy CEST (0,00), począwszy od nocy 18/19 maja o 1 CEST (0,04)

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

W przypadku zachmurzenia chmurami piętra niskiego (BOT) bądź (w przypadku stanowisk WIE i DOB) dowolnego piętra, amplituda zmienności wartości  $S_a$  w ciągu zachmurzonej nocy zdecydowanie przekraczała potencjalne zmiany tej wielkości

związane z wyłączeniem oświetlenia ulicznego, przez co tego typu dane z tych stanowisk nie były analizowane.

## 5. Dyskusja

### 5.1. Analiza pomiarów radiancji

Jak widać, spośród analizowanych miejscowości najwięcej światła wysyła w przestrzeń, oczywiście, miasto Kraków (ponad 26 tys.  $nW/cm^2 \cdot sr$ ), najmniej wieś Borzęcin (zaledwie 33  $nW/cm^2 \cdot sr$ ). Wartości te nie odzwierciedlają jednak stopnia zagęszczenia źródeł światła na danym obszarze, a to właśnie ta wielkość decyduje o lokalnym wrażeniu wizualnym tony świetlnej i jej oddziaływaniu na środowisko naturalne. W tabeli 5 uszeregowano wymienione miejscowości w kolejności malejącej gęstości radiancji na powierzchnię, z której była mierzona.

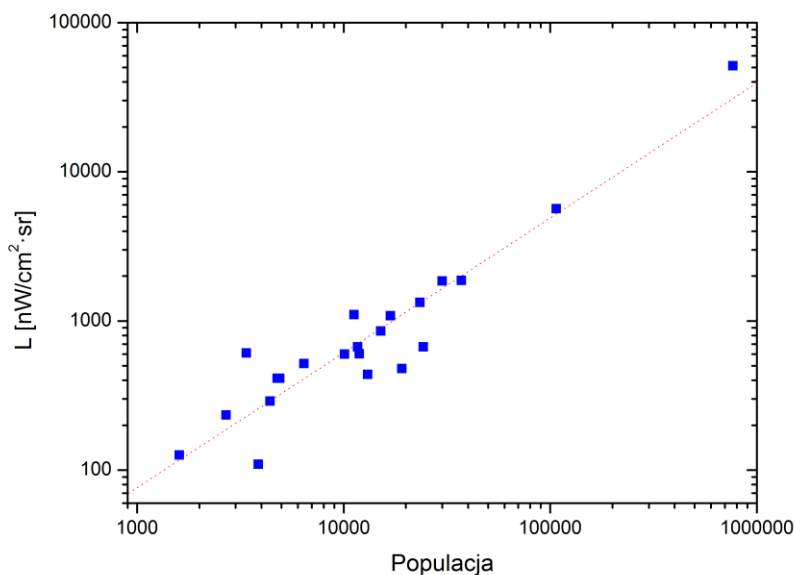
Tabela 5. Zestawienie pomiarów radiancji na  $km^2$  w wytypowanych miejscowościach gminnych województwa małopolskiego w marcu 2020 roku (posortowanych malejąco)

Miejscowość	radiancja w marcu 2020 [ $nW/cm^2 \cdot sr/km^2$ ]
Tarnów	173
Wadowice	164
Wieliczka	150
Skawina	123
Brzesko	109
Kraków	99
Chrzanów	93
Bochnia	90
Zabierzów	82
Limanowa	81
Krzyszowice	76
Dąbrowa Tarnowska	72
Rabka-Zdrój	65
Muszyna	51
Tymbark	47
Dębno	45
Dobczyce	42
Krynica-Zdrój	39
Borzęcin	32
Alwernia	31
Jabłonka	22

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych VIIRS/SNC.

Jak widać, największe zagęszczenie jasnych emiterów światła występuje w Tarnowie, Wadowicach i w Wieliczce, co potwierdzają raporty obserwatorów otrzymywane z tych obszarów.

Na rysunku 12 pokazano natomiast zależność ilości emitowanego światła od populacji. Stwierdzono wyraźną liniową zależność (przy współczynniku korelacji  $R = 0,9403$ ) między tymi wielkościami. Zależność ta jest zgodna z modelami zaproponowanymi przez Walkera [12] i Berry'ego [14].



**Rys. 12.** Radiancja z obszarów wybranych miejscowości województwa małopolskiego w funkcji wielkości populacji tych miejscowości. Widoczna jest wyraźna liniowa zależność między logarytmami tych wielkości ( $R=0,9209$ ;  $p\text{-value}=5 \cdot 10^{-10}$ )

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

Tabela 6 prezentuje, wyznaczoną dla obszaru pomiaru w każdej miejscowości (podaną w tabeli 3) różnicę (bezwzględną i względną) między wartością radiancji zmierzoną w marcu 2020 r. (trzecia kolumna tabeli 3), a wartością radiancji zmierzoną w miesiącu, w którym stwierdzono wyłączenie oświetlenia komunalnego w maksymalnym zakresie (czwarta kolumna tabeli 3).

Histogram (rys. 13) pokazuje rozkład miejscowości w województwie małopolskim w zależności od wielkości zmniejszenia radiancji względnej, będącego efektem wyłączenia oświetlenia komunalnego.

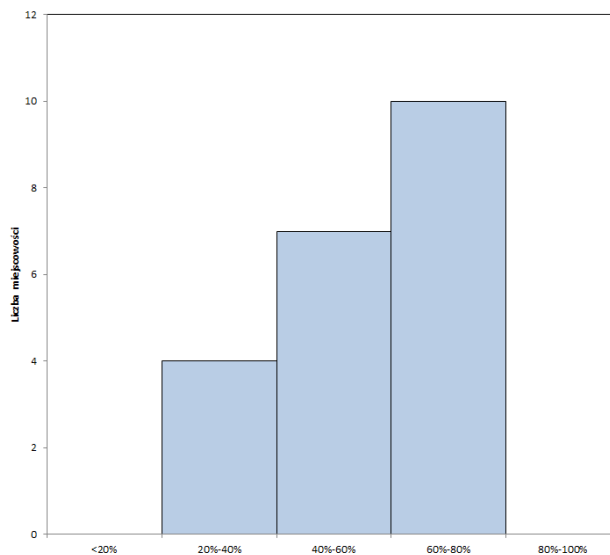
Tabela 6. Zmniejszenie się radiancji w wytypowanych miejscowościach gminnych województwa małopolskiego w 2020 roku związane z wyłączeniem oświetlenia komunalnego

Miejscowość	Bezwzględna zmiana radiancji [nW/cm <sup>2</sup> ·sr/km <sup>2</sup> ]	Względna zmiana radiancji [%]	Miesiąc 2020 roku o maksymalnym zakresie wyłączeń oświetlenia
Alwernia	265	44%	grudzień
Bochnia	1273	69%	czerwiec
Borzęcin	76	70%	maj
Brzesko	526	48%	czerwiec
Chrzanów	1257	66%	sierpień
Dąbrowa Tarnowska	406	68%	sierpień
Dębno	100	80%	październik
Dobczyce	158	31%	październik
Jabłonka	164	40%	lipiec
Kraków	25161	49%	maj
Krynica-Zdrój	563	51%	listopad
Krzyszowice	283	47%	czerwiec
Limanowa	575	67%	czerwiec
Muszyna	251	61%	maj
Rabka-Zdrój	295	67%	maj
Skawina	337	50%	czerwiec
Tarnów	3549	63%	maj
Tymbark	112	45%	październik
Wadowice	181	38%	lipiec
Wieliczka	840	63%	lipiec
Zabierzów	100	35%	sierpień

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

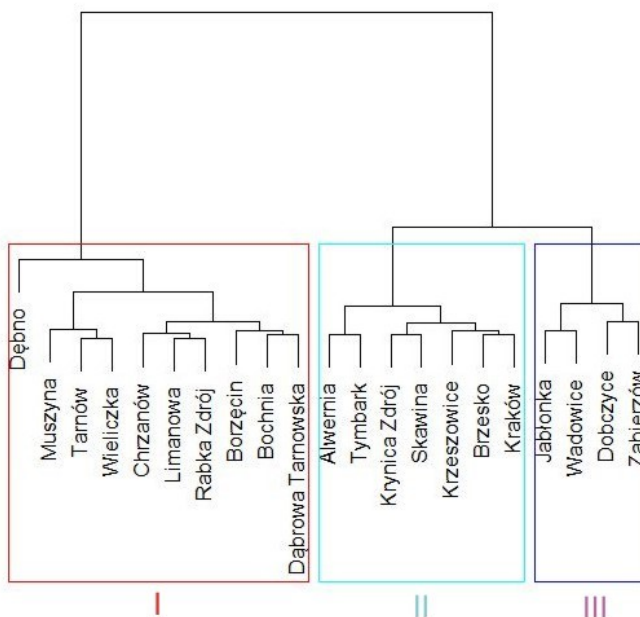
W celu uzyskania pełniejszego obrazu wpływu wyłączeń oświetlenia komunalnego na radiancję z poszczególnych miejscowości wykonano statystyczną analizę skupień. Na podstawie analizy elbow oraz analizy otrzymanego dendrogramu (rys. 14) można wyróżnić trzy skupienia (klastry) miejscowości. Ze względu na wielkość względnego zmniejszenia radiancji, klastry te koncentrują się wokół średniej wartości (67±5)% (klaster I), (48±3)% (klaster II) i (36±4)% (klaster III).

W grupie, reprezentowanej przez klaster I, znajdują się miejscowości, w których wyłączana była całość oświetlenia ulicznego. Klaster II obejmuje miejscowości, w których pozostawiono część oświetlenia ulicznego, uznaną na niezbędną do prawidłowego działania miasta. W przypadku Krakowa niewątpliwie ma tu znaczenie fakt pozostawienia włączonego oświetlenia reklamowego, części parkingów itp. W miejscowościach objętych przez klaster III wyłączane było jedynie oświetlenie peryferyjnych, mało istotnych komunikacyjnie ulic lub też – w przypadku Wadowic – pozostawiano oświetlenie dwóch głównych, przelotowych ulic, Parku Miejskiego oraz centralnego placu miasta (Plac Jana Pawła II). Obiekty te, jak widać, wnoszą znaczący wkład do całkowitej radiancji tej miejscowości.



**Rys. 13.** Rozkład miejscowości w Małopolsce w zależności od wielkości zmniejszenia radiancji względnej w efekcie wyłączenia oświetlenia komunalnego

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*



**Rys. 14.** Dendrogram pokazujący grupowanie analizowanych miejscowości względem procentowego zmniejszenia radiancji w okresie wyłączeń oświetlenia ulicznego

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.*

Z powyższej analizy wynika, że wkład całości oświetlenia komunalnego do całkowitej radiancji danej miejscowości wynosi około 67%.

Analizując dane dla poszczególnych miejscowości w obrębie klastra I stwierdzono (tabela 6), że największe zmniejszenie radiancji, wynoszące nawet 80%, wystąpiło dla niewielkich miejscowości (Dębno), gdzie dominującym źródłem nocnego oświetlenia jest oświetlenie uliczne, natomiast za pozostałe 20% odpowiedzialne jest głównie oświetlenie prywatnych posesji. Znajdujące się w tym klastrze duże miasta (Bochnia, Tarnów, Chrzanów, Wieliczka) odnotowały zmniejszenie się radiancji o około 67%. Za pozostałe 33% odpowiada, zapewne, oświetlenie spółdzielni mieszkaniowych (niepodlegające władzom komunalnym), posesji prywatnych, zakładów pracy, banerów reklamowych itp. Efekt ten jest jeszcze wyraźniej widoczny dla Krakowa, stolicy województwa małopolskiego, który, wraz ze Skawiną, przy zmniejszeniu radiancji o prawie 50%, znalazł się w klastrze II.

## 5.2. Analiza pomiarów jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba

W tabeli 7 zestawiono zmiany jasności powierzchniowej nocnego bezchmurnego i bezksiężycowego nieba ( $S_a$ ) zmierzone na stanowiskach pomiarowych znajdujących się w miejscowościach, w których wyłączano oświetlenie komunalne: Krakowie (BOT, KPO, KPO2), Wieliczce (WIE) i Dobczycach (DOB). Oprócz zmierzonych średnich wartości  $S_{a1}$  (przed momentem wyłączenia) i  $S_{a2}$  (po momencie wyłączenia) i ich różnic ( $\Delta S_a$ ) [ $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ ] podano odpowiadające im wartości luminancji  $L_{v1}$  i  $L_{v2}$  [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ] oraz ich różnicę bezwzględną ( $\Delta L_v$ ) i względną ( $\Delta L_v[\%]$ ).

Tabela 7. Średnie wartości zmian jasności powierzchniowej nocnego bezchmurnego i bezksiężycowego nieba zmierzone na stanowiskach pomiarowych

Stanowisko	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$\Delta S_a$	$L_{v1}$	$L_{v2}$	$\Delta L_v$	$\Delta L_v[\%]$
BOT	18,49	19,01	0,52	4,38	2,71	1,67	38%
KPO	18,53	19,06	0,50	4,23	2,59	1,56	37%
KPO2	18,56	19,14	0,60	4,12	2,42	1,80	44%
WIE	19,95	20,21	0,49	3,26	1,99	1,30	40%
DOB	21,35	21,49	0,14	0,31	0,28	0,04	13%

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych.

Analizując zawartość tabeli 7 można zauważyć, że zarówno w Krakowie, jak i w Wieliczce, pomimo dużej różnicy wielkości zmniejszenia radiancji między tymi miejscowościami (Kraków:  $25161 \text{ nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}/\text{km}^2$ , Wieliczka:  $840 \text{ nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}/\text{km}^2$ ), jasność powierzchniowa nocnego nieba zmniejsza się o około  $0,5 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ . Co ciekawe, na wielkość tę w niewielkim stopniu wpływa światło Księżyca w pełni (rys. 13). Względna zmiana luminancji w obu przypadkach wynosi około 40%, pomimo



znacznej różnicy względnej zmiany w radiancji (Kraków: 49%, Wieliczka: 63%). Efekt ten jest trudny do wyjaśnienia i wymaga dalszych badań. Natomiast, zgodnie z oczekiwaniami, niewielka zmiana radiancji w Dobczycach (bezwzględna:  $158 \text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr/km}^2$ , względna: 31%) prowadzi do niewielkich zmian zarówno wartości  $S_a$  ( $0,14 \text{ mag/arcsec}^2$ ), jak luminancji (bezwzględna:  $0,04 \text{ mcd/m}^2$ , względna: 13%).

Można też zauważyć, że wartość  $S_{a2}$  (jasność powierzchniowa bezchmurnego nieba przy wyłączonym oświetleniu komunalnym) różni się w zależności od położenia punktu pomiarowego. Większą jasność nieba w punktach położonych w Krakowie (BOT, KPO, KPO2) należy wiązać zapewne zarówno z niewyłączeniem części oświetlenia w mieście, jak też ze zwiększonym poziomem pyłu zawieszonego, będącego źródłem rozproszenia światła. W przypadku Wieliczki (WIE) niewątpliwie widoczny jest wpływ sąsiedniego Krakowa, w szczególności huty Arcellor Mittal, której część pozostawała w tym okresie silnym źródłem światła. W przypadku Dobczyc (DOB) niską jasność powierzchniową nieba zapewnia zarówno duża odległość od innych ośrodków miejskich, jak też usytuowanie w obszarze o zróżnicowanej rzeźbie terenu – lokalne wzniesienia osłaniają obszar miasta od światła pochodzącego z innych, nawet odległych, miejscowości.

### 5.3. Analiza pomiarów jasności powierzchniowej nocnego, zachmurzonego nieba

Na kilku stanowiskach możliwe było przeprowadzenie analizy wpływu wyłączenia oświetlenia ulicznego na jasność powierzchniową zachmurzonego nieba.

Najpełniejszą tego typu analizę można było przeprowadzić na stanowisku BOT, znajdującym się w centrum Krakowa. W celu określenia stopnia, a zwłaszcza rodzaju zachmurzenia wykorzystano zarówno metodę pochodnych dyskretnych [60, 61], jak też dane stacji meteorologicznej znajdującej się przy tym stanowisku. W ciągu kilku nocy zaobserwowano, że w obecności na niebie chmur piętra wysokiego (i nielicznych chmur piętra średniego) w momencie wyłączenia oświetlenia ulicznego typowa dla nieba zachmurzonego krzywa zmian jasności „wypłaszczała się”, przyjmując wygląd charakterystyczny dla nieba bezchmurnego (rys. 17). Jest to zgodne z wcześniejszymi spostrzeżeniami [61, 62], zgodnie z którymi zauważalne rozproszenie światła na chmurach piętra wysokiego zachodzi jedynie dla dużych miast, przy dużej wartości radiancji. Analogicznego efektu nie zaobserwowano w innych miastach, gdzie prowadzony jest ciągły pomiar jasności nocnego nieba (Wieliczka i Dobczyce). Nie jest on również widoczny nawet w Krakowie w przypadku zachmurzenia chmurami piętra niskiego, np. typu Stratus.

Na znajdujących się w obrębie Krakowa stanowiskach KPO i KPO2, gdzie prowadzone były ręczne pomiary jasności powierzchniowej nieba wraz z odnotowywaniem rodzaju chmur i stopnia zachmurzenia stwierdzono, że przy zachmurzeniu chmurami piętra niskiego wartość  $S_a$  w momencie wyłączenia oświetlenia zmienia się o  $0,5\text{--}0,7 \text{ mag/arcsec}^2$  i wielkość ta nie zależy od rodzaju czy pułapu chmur.

## 6. Wnioski

Przeprowadzona analiza danych VIIRS/DNB wykazała, że w każdej z analizowanych gmin wyłączenie oświetlenia ulicznego w znaczący sposób zmniejszało radiancję. W przypadku, gdy wyłączana była całość tego rodzaju oświetlenia, w miejscowościach, gdzie jest ono dominującym źródłem sztucznego światła w nocy, radiancja zmniejszyła się o prawie 70% (niekiedy nawet 80%) w stosunku do wartości sprzed pandemii. W dużych miastach, gdzie oprócz oświetlenia ulicznego istnieją też inne źródła światła, jak zakłady przemysłowe czy reklamy, radiancja zmniejszyła się o prawie 50%. Podobne zmniejszenie radiancji odnotowano w mniejszych miejscowościach, w których pozostawiano oświetlenie głównych traktów komunikacyjnych. Z kolei wyłączenie jedynie oświetlenia niektórych, peryferyjnych ulic, obniżyło radiancję tylko o około 36%.

Z powyższych danych wynika, że redukcja oświetlenia nawet części ulic (osiedlowych, lokalnych) znacząco obniża emisję sztucznego światła w niebo. Oczywiście, nie jest możliwe stałe wyłączenie tego rodzaju oświetlenia, można jednak rozważyć pozostawienie stałego oświetlenia jedynie głównych traktów komunikacyjnych przy jednoczesnym zamontowaniu czujników ruchu przy oświetleniu ulic o małym natężeniu ruchu, w szczególności osiedlowych i lokalnych. Z prezentowanej analizy wynika, że można w ten sposób osiągnąć kilkudziesięcioprocentową redukcję emisji światła w niebo.

Wyłączenia oświetlenia ulicznego i wynikające stąd zmniejszenie wielkości energii emitowanej w niebo powoduje oczywiście zmniejszenie jasności tony świetlnej nocnego nieba, zarówno w przypadku nieba bezchmurnego, jak też zachmurzonego. W przypadku nieba bezchmurnego w miastach o dużej wartości radiancji z jednostki powierzchni (Kraków, Wieliczka), stwierdzono zmniejszenie jasności powierzchniowej nocnego nieba o około  $0,5 \text{ mag/arcsec}^2$ , co oznacza zmniejszenie luminancji o około 40%. Można zauważyć, że jest to wielkość zbliżona do względnej redukcji radiancji w tych miejscowościach. Niestety, tylko w wymienionych dwóch miastach, w których wyłączana była całość oświetlenia ulicznego, wykonywane były również pomiary jasności tony świetlnej. W przypadku Dobczyc przeszkodą w uzyskaniu liczebnej serii pomiarowej była mała liczba bezchmurnych nocy, jednak w maju 2020 roku zmierzona redukcja jasności powierzchniowej wyniosła około  $0,1 \text{ mag/arcsec}^2$ , czyli luminancja zmniejszyła się o 13%. Niestety, ten pojedynczy pomiar nie pozwala na jakiegokolwiek porównania z mierzoną w tym samym czasie redukcją radiancji, zwłaszcza, że w tym okresie stopniowo wyłączano oświetlenie jedynie niewielkiej liczby peryferyjnych ulic.

W przypadku nocy zachmurzonych, pomiary wykonane w Krakowie pokazały wyraźny efekt „spłaszczenia” krzywej jasności powierzchniowej w obecności na niebie wyłącznie chmur piętra wysokiego. Po wyłączeniu oświetlenia ulicznego krzywa ta przybierała kształt i wartość zbliżone do obserwowanych przy niebie bezchmurnym. Oznacza to, że chmury piętra wysokiego w znaczącym stopniu rozjaśniają niebo wyłącznie przy bardzo wysokiej wartości radiancji dużego miasta. Efekt ten nie był

obserwowany na pozostałych stanowiskach pomiarowych, znajdujących się w mniejszych miejscowościach. Stwierdzono, że względny spadek luminancji zachmurzonego nieba na skutek wyłączenia oświetlenia ulicznego wynosi około 40%, co jest wartością analogiczną, jak w przypadku nieba bezchmurnego.

## Podziękowania

Autor pragnie podziękować Katarzynie Piotrowicz za dostarczenie danych meteorologicznych ze Stacji Naukowej Zakładu Klimatologii IGiGP UJ „Ogród Botaniczny” w Krakowie (BOT); Sebastianowi Wypychowi za nadzorowanie pomiarów SQM na tej stacji pomiarowej; Jackowi Stasikowi z Wodociągów Krakowskich za nadzorowanie nad pomiarami SQM w Dobczycach (DOB); Marcinowi Filipkowi za pomiary SQM w Jerzmanowicach (JER); Dominikowi Pasternakowi i Edwardowi Siwkowi za nadzorowanie pomiarów SQM w Niepołomicach (NIE); pracownikom naukowym Obserwatorium Astronomicznego UP w Krakowie na Suhorze, w szczególności Waldemarowi Ogłozie i Markowi Dróżdźowi, za nadzorowanie pomiarów SQM oraz dostarczanie danych meteorologicznych i obrazów z kamery All-Sky (SUH); Wiesławowi Kaszowskiemu za nadzorowanie pomiarów SQM w Wieliczce i Kasince Małej (WIE i KAS); Sławomirowi Stachniewiczowi za wykonywanie pomiarów SQM oraz analizowanie stanu zachmurzenia w Zabierzowie (ZAB). Podziękowania należą się również urzędnikom miejskim i gminnym województwa małopolskiego za dostarczenie informacji o zakresie przestrzennym i czasowym wyłączania oświetlenia ulicznego: Krzysztofowi Płazie (Kraków), Ilonie Aniończyk–Kępie (Alwernia); Agnieszce Piekarskiej (Borzęcin); Otylii Haber (Brzesko); Krzysztofowi Bilskiemu i Jolancie Zubik (Chrzanów); Stanisławowi Molikowi (Czernichów); Annie Łanocha (Dębno); Tomaszowi Susiowi (Dobczyce); Bolesławowi Wójcikowi (Jabłonka); Ewie Baranowskiej (Krzeszowice); Rafałowi Woźniakowi i Władysławowi Biedzie (Limanowa); Eugeniuszowi Koziolowi (Liszki); Andrzejowi Banaśkiewiczowi (Miechów); Włodzimierzowi Tokarczykowi (Muszyna); Leszkowi Świderowi (Rabka-Zdrój); Grzegorzowi Koziolowi (Tarnów); Agnieszce Kiełbasie (Tymbark); Krzysztofowi Grajnemu (Wadowice); Elżbiecie Kłapie (Wieliczka) i Dariuszowi Hajto (Zabierzów).

## Literatura

- [1] Guillemin A., *Le Ciel*, L. Hachette, Paris, 1866, s. 384–385.
- [2] *Astronomy for Amateurs*, J.A.W. Oliver (ed.), Longmans, Green, 1888, s. 295.
- [3] Massey P., Gronwall C., Pilachowski C.A., *The spectrum of the Kitt Peak night sky*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1990, 102, s. 1046, DOI: 101086/132733.
- [4] Ścieżor T., *Light pollution at the Botanical Garden of Jagiellonian University – preliminary analysis* [w:] *Ecological and astronomical aspects of light pollution*, T. Ścieżor [red.], Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2020, s. 75–91.

- [5] Brons J., Bullough J., Rea M., *Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution*, Lighting Research and Technology, 2008, 40, s. 201–224, DOI: 10.1177/1477153508094059.
- [6] Guanglei W., Ngarambe J., Kim G.A., *Comparative Study on Current Outdoor Lighting Policies in China and Korea: A Step toward a Sustainable Nighttime Environment*, Sustainability, 2019, 11, DOI: 10.3390/su11143989.
- [7] Zielińska-Dabkowska K.M., Xavia K., Bobkowska K., *Assessment of Citizens' Actions against Light Pollution with Guidelines for Future Initiatives*, Sustainability, 2020, 12, DOI: 10.3390/su12124997.
- [8] Helbich M., Browning M.H.E.M., Huss A., *Outdoor light at night, air pollution and depressive symptoms: A cross-sectional study in the Netherlands*, Science of The Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140914.
- [9] Pothukuchi K., *City Light or Star Bright: A Review of Urban Light Pollution, Impacts, and Planning Implications*, Journal of Planning Literature, 2021, DOI: 10.1177/0885412220986421.
- [10] Walker M.F., *The California Site Survey*, Publications of The Astronomical Society of The Pacific, 1970, 82, s. 672, DOI: 10.1086/128945.
- [11] Walker M.F., *Light Pollution in California and Arizona*, Publications of The Astronomical Society of The Pacific, 1973, 85, s. 508, DOI: 10.1086/129496.
- [12] Walker M.F., *The effects of urban lighting on the brightness of the night sky*, Publications of The Astronomical Society of The Pacific, 1977, 89, s. 405, DOI: 10.1086/130142
- [13] Treanor P.J., *A Simple Propagation Law for Artificial Night-Sky Illumination*, Observatory, 1973, 93, s. 117–120.
- [14] Berry R.L., *Light Pollution in Southern Ontario*, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 1976, 70, s. 97–115.
- [15] Garstang R.H., *Improved Scattering Formula for Calculations of Artificial Night-Sky Illumination*, Observatory, 1984, 104, s. 196–197.
- [16] Garstang, R.H., *Light Pollution Modeling*, International Astronomical Union Colloquium, 112, s. 56–69, DOI: 10.1017/S0252921100003705.
- [17] Garstang R.H., *Model for Artificial Night-Sky Illumination*, Publications of The Astronomical Society of The Pacific, 1986, 98, s. 364, DOI: 10.1086/131768.
- [18] Aube M., Franchomme-Fosse L., Robert-Staehler P., Houle V., *Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment: Toward a night-time aerosol optical depth retrieval method*, Proceedings of the Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring, San Diego, CA, USA, 1–4 August 2005.
- [19] Aubé M., Simoneau A., Muñoz-Tunõn C., Díaz-Castro J., Serra-Ricart M., *Restoring the night sky darkness at Observatorio del Teide: First application of the model Illumina version 2*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 497, s. 2501–2516. DOI: 10.1093/mnras/staa2113.
- [20] Kolláth Z., *The effects of artificial lights at the Zselic Landscape Protection Area*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 84, s. 76–79.
- [21] Pun C.S.J., So C.W., *Night-sky brightness monitoring in Hong Kong. Acity-wide light pollution assessment*, Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184, s. 2537–2557, DOI: 10.1007/s10661-011-2136-1.

- [22] Pun C.S.J., So C.W., Leung W.Y., Wong C.F., *Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 139, s. 90–108, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.014.
- [23] Kubala M., Ścieżor T., Dworak T.Z., Kaszowski W., *Artificial Sky Glow in Cracow Agglomeration*, Polish Journal of Environmental Studies, 2009, 18, s. 194–199.
- [24] Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej*, Monografia 388, Politechnika Krakowska, Kraków, 2010.
- [25] Ścieżor T., Kubala M., *Particulate matter as an amplifier for astronomical light pollution*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 444, s. 2487–2493, DOI: 10.1093/mnras/stu1577
- [26] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, 328, s. 689–707, DOI: 10.1046/j.1365–8711.2001.04882.x.
- [27] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., Baugh K.E., *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2000, 318, s. 641–657, DOI: 10.1046/j.1365–8711.2000.03562.x.
- [28] Cinzano P., Elvidge C.D., *Night sky brightness at sites from DMSP–OLS satellite measurements*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, 353, s. 1107–1116, DOI: 10.1111/j.1365–2966.2004.08132.x.
- [29] Wolfe R.E., Lin G., Nishihama M., Tewari K.P., Tilton J.C., Isaacman A.R., *Suomi NPP VIIRS prelaunch and on–orbit geometric calibration and characterization*, Journal of Geophysical Research. Atmospheres, 2013, 118, s. 11508–11521, DOI: 10.1002/jgrd.50873.
- [30] VIIRS Maps, <https://www.lightpollutionmap.info> (dostęp: 3 stycznia 2022).
- [31] Elvidge C.D., Baugh K.E., Zhizhin M., Hsu F.-C., *Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights*, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2013, 35, s. 62, DOI: 107125/APAN.35.7.
- [32] Duriscoe D.M., Anderson S.J., Luginbuhl C.B., Baugh K.E., *A simplified model of all–sky artificial sky glow derived from VIIRS Day/Night band data*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 214, s. 133–145, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.028.
- [33] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, 2016, 2, e1600377, DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- [34] Zhang C., Pei Y., Li J., Qin Q., Yue J., *Application of LuoJia 1–01 Nighttime Images for Detecting the Light Changes for the 2019 Spring Festival in Western Cities, China*, Remote Sensing, 2020, 12, DOI: 10.3390/rs12091416.
- [35] Levin N., Kyba C.C.M., Zhang Q., Sánchez de Miguel A., Román M.O., Li X., Portnov B.A., Molthan A.L., Jechow, A., Miller S.D., *Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future*, Remote Sensing of Environment, 2020, 237, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111443.
- [36] Luginbuhl C.B., Lockwood G.W., Davis D.R., Pick K., Selders J., *From The Ground Up I: Light Pollution Sources in Flagstaff, Arizona*. Publications of The Astronomical Society of The Pacific, 2009, 121, s. 185–203, DOI: 10.1086/597625.

- [37] Hiscocks P.D., Gudmundsson S., Hiscocks P.D., Gudmundsson S., *The Contribution of Street Lighting to Light Pollution*, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 2010, 104, s. 190–192.
- [38] Ściążor T., Kubala M., *Wpływ chmur niskich i wysokich na bliskie i dalekie zanieczyszczenie świetlne*, Czasopismo Techniczne, 2012, 109, 23, s. 253–260, DOI: 10.4467/2353737XCT.14.065.1842.
- [39] Jechow A., Ribas S.J., Domingo R.C., Hölker F., Kolláth Z., Kyba C.C.M., *Tracking the dynamics of skyglow with differential photometry using a digital camera with fisheye lens*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 209, s. 212–223, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.01.032.
- [40] Jechow A., *Observing the impact of WWF earth hour on Urban light pollution: A case study in Berlin 2018 using differential photometry*, Sustainability, 2019, 11, s. 750, DOI: doi.org/10.3390/su11030750.
- [41] Kyba C., Ruby A., Kuechly Dipl-Geoö kol H., Kinzey B.M., Miller N.M., Sanders M.B.A. J., Barentine J., Kleinodt Dipl-Ing R., Espey B., *Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas*. Lighting Research and Technology, 2020, DOI: 10.1177/1477153520958463.
- [42] Barentine J.C., Kundracik F., Kocifaj M., Sanders J.C., Esquerdo G.A., Dalton A.M., Foott B., Grauer A., Tucker S., Kyba C.C.M., *Recovering the city street lighting fraction from skyglow measurements in a large-scale municipal dimming experiment*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 253, 107120, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107120.
- [43] Kyba C.C.M., Ruby A., Kuechly H.U., Kinzey B., Miller N., Sanders J., Barentine J., Kleinodt R., Espey B., *Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas*, Lighting Research and Technology, 2020, DOI: 10.1177/1477153520958463.
- [44] Bustamante–Calabria M., de Miguel A.S., Martín–Ruiz S., Ortiz J.L., Vílchez J.M., Pelegrina A., García A., Zamorano J., Bennie J., Gaston K.J., *Effects of the Covid-19 lockdown on urban light emissions: Ground and satellite comparison*, Remote Sensing, 2021, 13, DOI: 10.3390/rs13020258.
- [45] Jechow A., Hölker F., *Evidence that reduced air and road traffic decreased artificial night-time skyglow during COVID-19 lockdown in Berlin, Germany*, Remote Sensing, 2020, 12, DOI: 10.3390/rs12203412.
- [46] Saadat S., Rawtani D., Hussain C.M., *Environmental perspective of COVID–19*, Science of The Total Environment, 2020, 728, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138870.
- [47] Le Quéré C., Jackson R.B., Jones M.W., Smith A.J.P., Abernethy S., Andrew R.M., De–Gol A.J., Willis D.R., Shan Y., Canadell J.G., *Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID–19 forced confinement*, Nature Climate Change, 2020, 10, s. 647–653, DOI: 10.1038/s41558–020–0797–x.
- [48] Lokhandwala S., Gautam P., *Indirect impact of COVID-19 on environment: A brief study in Indian context*, Environmental Research, 2020, 188, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109807.
- [49] Lecocq T., Hicks S.P., van Noten K., van Wijk K., Koelemeijer P., de Plaen R.S.M., Massin F., Hillers G., Anthony, R.E., Apoloner M.T., *Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures*, Science, 2020, 369, s. 1338–1343, DOI: 10.1126/science.abd2438.

- [50] Ścieżor T., *Effect of street lighting on the urban and rural night-time radiance and the brightness of the night sky*, Remote Sensing, 2021, 13, 9, DOI: 10.3390/rs13091654.
- [51] Województwo Małopolskie 2019 – Podregiony, Powiaty, Gminy, <https://krakow.stat.gov.pl/publikacje-ifoldery/roczniki-statystyczne/wojewodztwo-malopolskie-2019-podregiony-powiaty-gminy,7,16.html> (dostęp: 03.01.2022).
- [52] Teikari P., *Light Pollution: Definition, Legislation, Measurement, Modeling and Environmental Effects*, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, 2007.
- [53] Bará S., Tapia C., Zamorano J., *Absolute Radiometric Calibration of TESS-W and SQM Night Sky Brightness Sensors*, Sensors 2019, 19, art. 1336, DOI: 10.3390/s19061336.
- [54] Crawford D.L. *Photometry: Terminology and units in the lighting and astronomical sciences*, Observatory, 1997, 117, s. 14–18.
- [55] Kyba C.C.M., Ruhtz T., Fischer J., Hölker F., *Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems*, PLoS ONE, 2011, 6, e17307, DOI: 10.1371/journal.pone.0017307.
- [56] Earth Observation Group, <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/> (dostęp 3.01.2022).
- [57] Sánchez de Miguel A., Aubé M., Zamorano J., Kocifaj M., Roby J., Tapia C., *Sky Quality Meter measurements in a colour-changing world*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 467, s. 2966–2979, DOI: <http://doi.org/10.1093/mnras/stx145>.
- [58] Hänel A., Posch T., Ribas S.J., Aubé M., Duriscoe D., Jechow A., Kollath Z., Lolkema D.E., Moore C., Schmidt N., et al., *Measuring night sky brightness: Methods and challenges*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 205, s. 278–290, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>.
- [59] EarthData, *Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center*, LAADS Archive, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/5000/?process=ftpAsHttp&path=allData%2f5000> (dostęp: 03.01.2022).
- [60] Ścieżor T., *Overnight measurements of the sky brightness as a method for assessing the cloudiness*, Photonics Letters of Poland, 2019, 11, s. 72–74, DOI: 10.4302/plp.v11i3.913.
- [61] Ścieżor T., *The impact of clouds on the brightness of the night sky*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 247, 106962, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106962.
- [62] Jechow A., Kolláth Z., Ribas S.J., Spoelstra H., Hölker F., Kyba C.C.M., *Imaging and mapping the impact of clouds on skyglow with all-sky photometry*, Scientific Reports, 2017, 7, s. 1–10, DOI: 10.1038/s41598-017-06998-z.

## IMPACT OF THE COVID-19 PANDEMIC ON LIGHT POLLUTION OF THE NIGHT SKY

**Abstract:** In 2020, due to the COVID-19 pandemic and the decrease in public traffic at night, the authorities of several municipalities in Lesser Poland decided to turn off municipal lighting at night. This is the first time that street lights have been turned off for such a long time and over such a large area, including in urban areas. This gave a unique opportunity to analyse the share of municipal lighting in light pollution. For this purpose, both the existing light pollution monitoring stations in Kraków and the neighbouring municipalities, as well as satellite data on changes in light radiance from the studied areas were used. It was found that after switching off the communal lighting the surface brightness of the cloudless sky decreased by approx. 40%. In each of the analysed communes, the effect of a significant decrease in light radiance as a result of switching off-street lighting was also found. In the case of completely switching off-street lighting in a given locality, this value decreased by almost 70%.

**Keywords:** light pollution, radiance, luminance, street lighting, COVID-19





# JAKOŚĆ NOCNEGO NIEBA W OBSERWATORIACH ASTRONOMICZNYCH NA PODSTAWIE MONITORINGU PROWADZONEGO PRZEZ SIEĆ ALPS

**Sylwester Kołomański**

Instytut Astronomiczny, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Wrocławski  
*sylwester.kolomanski@uwr.edu.pl*

**Przemysław J. Mikołajczyk**

Instytut Astronomiczny, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Wrocławski  
Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

**Krzysztof Kotysz**

**Piotr Łojko**

Instytut Astronomiczny, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Wrocławski

**Streszczenie:** Polska jest krajem o dużym i narastającym zanieczyszczeniu światłem. Dla astronomii jakość nocnego nieba, na którą w istotny sposób wpływa zanieczyszczenie światłem, jest kluczowa dla możliwości prowadzenia badań naukowych. ALPS to sieć automatycznych stacji przeznaczonych do ciągłego monitoringu nieba. Stacje te rejestrują obrazy całego nieba oraz dokonują pomiaru jego jasności. Znajdują się one obecnie głównie w obserwatoriach astronomicznych. Głównym celem projektu jest badanie poziomu jasności nocnego nieba z uwzględnieniem warunków meteorologicznych oraz śledzenie zmian i źródeł zanieczyszczenia światłem.

Na podstawie zebranych dotychczas danych ALPS określony został stopień degradacji nocnego nieba w obserwatorium astronomicznym w Białkowie, obserwatorium astronomicznym w Piwnicach i obserwatorium astronomicznym w Sopotni Wielkiej. Otrzymane wyniki pokazują, że konieczne jest pilne podjęcie działań mających na celu ochronę nocnego nieba nad obserwatoriami astronomicznymi w Polsce.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, obserwatoria astronomiczne, jasność nocnego nieba

## 1. Wstęp

W ostatnich dwustu latach szybki rozwój techniki świetlnej pozwolił na wynalezienie i wprowadzenie do codziennego wykorzystania źródeł światła elektrycznego o coraz większej skuteczności świetlnej. Dzięki temu możliwe stało się technicznie i ekonomicznie oświetlanie przestrzeni zewnętrznych. Światło elektryczne stało się jednym z czynników umożliwiających funkcjonowanie współczesnego społeczeństwa.

Powszechne stosowanie światła elektrycznego, zwłaszcza w przestrzeniach zewnętrznych, ma niestety również wymiar negatywny określany terminem zanieczyszczenie światłem (ZŚ). W tym miejscu warto wspomnieć, że światło elektryczne w literaturze dotyczącej problemu ZŚ często określane jest terminem sztuczne światło (ang. *artificial light*). Termin ten może budzić wątpliwości, ponieważ światło elektryczne z punktu widzenia fizyki nie różni się od światła emitowanego przez obiekty naturalne, np. Słońce. Dlatego w dalszej części tego tekstu będzie używany termin światło antropogeniczne.

Przykładem ZŚ jest niekorzystny wpływ światła antropogenicznego na organizmy żywe [1]. Światło antropogeniczne powoduje również zwiększenie jasności powierzchniowej nocnego nieba, która w warunkach braku zanieczyszczenia światłem jest bardzo niska [2]. Rozpraszanie w atmosferze światła antropogenicznego podnosi jasność nieba bardzo wyraźnie. Dodatkowo istotnym czynnikiem wpływającym na natężenie tego zjawiska są warunki pogodowe [3]. Modele ZŚ przewidują, że przy bezchmurnym niebie jego jasność powierzchniowa w zenicie w centrach dużych miast przekracza poziom naturalny nawet czterdziestokrotnie [4]. W warunkach naturalnych bezchmurne niebo nocne ma taką jasność tylko w czasie pełni Księżyca.

Według Międzynarodowej Unii Astronomicznej (*International Astronomical Union*, IAU) wzrost tej jasności wskutek ZŚ o zaledwie 10% stanowi utrudnienie dla prowadzenia obserwacji obiektów astronomicznych [5]. Większa jasność nieba zmniejsza liczbę obiektów możliwych do zaobserwowania i zwiększa błędy w zgromadzonych danych. Podwyższony poziom jasności nieba nie tylko znacząco redukuje liczbę obiektów widocznych na obrazach astronomicznych, ale w rezultacie obniża zasięg profesjonalnych teleskopów astronomicznych. Jest to szczególnie widoczne przy zastosowaniu profesjonalnych kamer CCD o wysokiej czułości i wysokiej sprawności kwantowej oraz przy zastosowaniu długich czasów ekspozycji. Przy pewnym poziomie ZŚ obserwacje astronomiczne stają się praktycznie niemożliwe. W XX wieku tak zła sytuacja zaistniała w przypadku dawnych obserwatoriów astronomicznych, które zlokalizowane były w miastach (rys. 1).

Ze szczególnie dużym poziomem ZŚ borykają się obserwatoria położone w krajach wysoko rozwiniętych, a sytuacja ulega stałemu pogarszaniu. W większości krajów europejskich zanieczyszczenie światłem wciąż wzrasta [6, 7]. Spośród nich Polska lokuje się w czołówce pod względem tempa tego wzrostu.



**Rys. 1.** Obrazy z kamer ASC stacji ALPS–WRO (po lewej) i ALPS–BIA (po prawej). Widoczna wyraźna degradacja nocnego nieba nad Wrocławiem w lokalizacji dawnego obserwatorium astronomicznego (obecnie Instytut Astronomiczny UWr). W Białkowie (lokalizacja obecnego obserwatorium) poziom zanieczyszczenia światłem jest stosunkowo niski, co umożliwia prowadzenie profesjonalnych obserwacji astronomicznych. Zdjęcia wykonane tej samej nocy w odstępie 27 min. Czas ekspozycji dla Białkowa jest 6 krotnie dłuższy niż dla Wrocławia.

Kierunek S jest na dole kadru, kierunek W – po prawej

*Źródło: opracowanie własne.*

Na podstawie danych satelitarnych oszacowano, że w Polsce w okresie od 1992 do 2017 roku moc emitowana z instalacji oświetlenia zewnętrznego wzrosła około 2,5-krotnie [7]. Skutkiem tego jest postępująca degradacja nocnego nieba, czyli wzrost jego jasności.

Degradacja nocnego nieba jest największa na obszarach zurbanizowanych. Jednak zjawisko to dotyczy również obszarów niezurbanizowanych. Światło antropogeniczne propaguje się na znaczne odległości od swoich źródeł, ulegając rozproszeniu w atmosferze. W efekcie obszar, nad którym dochodzi do degradacji nocnego nieba, jest wyraźnie większy niż obszar, na którym znajduje się infrastruktura oświetleniowa [8]. Obrazowo mówi się, że obszary oświetlane (np. miasta) tworzą wyspy świetlne. W krajach o dużej gęstości zaludnienia i jednostek osadniczych wyspy świetlne mogą łączyć się ze sobą, prowadząc do zaniku obszarów naturalnego nieba nocnego [4]. Przykładem takiego kraju jest Polska.

Zanieczyszczenie światłem nie tylko utrudnia prowadzenie obserwacji astronomicznych, ale powoduje też zmniejszenie efektywności sprzętu obserwacyjnego oraz spadek jego wartości. Oszacowano, że np. zaledwie dwukrotny wzrost jasności nocnego nieba względem jasności naturalnej oznacza efektywne zmniejszenie

apertury teleskopu o około 30%, co przekłada się na spadek jego wartości o około 60% [9]. Budowa obserwatorium astronomicznego jest kosztowna. Jego przeniesienie w inne miejsce z powodu wzrostu jasności nieba i wynikającego stąd zmniejszenia się możliwości prowadzenia badań naukowych, jest praktycznie niemożliwe. Dlatego istotne jest zapewnienie istniejącym obserwatoriom ochrony przed wzrostem poziomu ZŚ lub przynajmniej spowolnienie tego trendu.

W Polsce z powodów klimatycznych nie ma dużych obserwatoriów astronomicznych prowadzących badania naukowe. Istniejące obserwatoria to przede wszystkim obserwatoria uniwersyteckie. Znajdujące się w tych obserwatoriach teleskopy optyczne mają średnice mieszczące się w przedziale 50–100 cm. Pomimo mniejszych możliwości klimatyczno-sprzętowych obserwatoria te odgrywają istotną rolę. Prowadzone tu badania obejmują ważne obecnie w astronomii tematy, takie jak: chronometraż tranzytów planetarnych oraz monitoring astrofizycznych zjawisk tymczasowych, np. soczewkowania grawitacyjnego czy wybuchów supernowych. Niestety, z powodu rosnącego ZŚ na znaczeniu tracić będą badania polegające na cyklicznym monitorowaniu różnego rodzaju obiektów, np. gwiazd zmiennych w gromadach. Część gwiazd należących np. do gromad kulistych niebawem znajdzie się poza zasięgiem teleskopów, którymi do niedawna mogły być z powodzeniem obserwowane. Należy też wspomnieć, że oprócz obserwatoriów profesjonalnych, działają w Polsce również obserwatoria amatorskie, które pełnią nie mniej ważną rolę edukacyjną i popularyzacyjną. W tym przypadku wzrost jasności nocnego nieba wywołany ZŚ może nie mieć aż tak krytycznego znaczenia, jak w obserwatoriach profesjonalnych, ale i tu należy spodziewać się trudności w prowadzeniu obserwacji.

W związku z szybko narastającym w Polsce zanieczyszczeniem światłem, konieczne jest m.in. stałe monitorowanie poziomu tego zanieczyszczenia w obserwatoriach astronomicznych. Wskutek braku odpowiednich regulacji prawnych, poddane są one dużej presji wywieranej przez ZŚ, a jednocześnie dla wielu z nich brakuje odpowiednich i obszernych danych na temat poziomu tego zanieczyszczenia. Gromadzenie takich danych pozwoliłoby na dokładne określenie aktualnej sytuacji i trendów. Dane te umożliwiłyby też ocenę skuteczności działań mających racjonalnie ograniczyć to zanieczyszczenie, w sytuacji wprowadzenia takich działań. Takie badania są jednym z głównych celów naukowych projektu All-Sky Light Pollution Survey (ALPS).

## 2. Instrumenty i dane

Projekt ALPS to rozbudowywana sieć automatycznych stacji przeznaczonych do ciągłego monitoringu nieba. Stacje rejestrują obrazy całego nieba oraz dokonują pomiaru jego jasności. Obrazy z kamery umożliwiają m.in. określenie przyczyn zmian jasności mierzonych przez fotometr i stanowią dodatkowe źródło danych na temat jasności nieba.

Obecnie sieć ALPS składa się z pięciu stacji:

- 1) ALPS–WRO zlokalizowana we Wrocławiu w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu Wrocławskiego (IA UWr) [10]. Stacja działa od lipca 2017 roku.
- 2) ALPS–BIA zlokalizowana w obserwatorium astronomicznym UWr w miejscowości Biazków. Stacja działa od sierpnia 2018 roku.
- 3) ALPS–PIW zlokalizowana w obserwatorium astronomicznym Uniwersytetu Mikołaja Kopernika (UMK) w miejscowości Piwnice. Stacja powstała we współpracy z Instytutem Astronomii UMK. Stacja działa od czerwca 2020 roku.
- 4) ALPS–SOP zlokalizowana w obserwatorium astronomicznym w miejscowości Sopotnia Wielka. Stacja powstała we współpracy ze Stowarzyszeniem Polaris – OPP. Stacja działa od grudnia 2020 roku.
- 5) ALPS–OST zlokalizowana w stacji obserwacyjnej Uniwersytetu Warszawskiego (UW) w miejscowości Ostrowik. Stacja powstała we współpracy z Obserwatorium Astronomicznym UW. Stacja działa od grudnia 2021 roku.

Dodatkowo do sieci ALPS dołączone jest Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie zlokalizowane na Suhorze (pasmo górskie Gorców). Kamera i fotometr stamtąd są również częścią sieci pomiarowej Pracowni Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego Politechniki Krakowskiej [11].

We wszystkich pięciu wcześniej wymienionych stacjach znajduje się takie samo wyposażenie badawcze:

- Fotometr Sky Quality Meter model LU–DL (SQM–LU–DL) lub model LU (SQM–LU). Oba modele mają takie same charakterystyki techniczne. Jedyną różnicą jest to, że SQM–LU–DL posiada wewnętrzną pamięć do zapisu pomiarów. Ta różnica nie jest istotna z punktu widzenia działania w sieci ALPS, ponieważ zbierane pomiary są na bieżąco przesyłane do centralnego komputera sieci.
- Kamera ZWO z obiektywem typu „rybie oko” model ASI 224MC lub ASI 178MC. Oba modele wyposażone są w matrycę CMOS z maską barwną RGB Bayera, ale różnią się jej rozmiarem (1304 x 976 pikseli w przypadku modelu 224, 3096 x 2080 pikseli w przypadku modelu 178). Pole widzenia kamery wynosi około 185 x 155 stopni. W dalszej części pracy do tej kamery będziemy się odnosić, używając skrótowca ASC (*All-Sky Camera*).

Pracą obu instrumentów oraz zestawu czujników środowiskowych i modułu grzejnego, zawiaduje komputer typu Raspberry Pi znajdujący się wewnątrz każdej stacji i wyposażony w specjalnie do tego celu napisany zestaw oprogramowania. Dane zbierane przez stacje wysyłane są do komputera centralnego sieci ALPS, który wykonuje zadanie archiwizacji i udostępniania danych w formie strony internetowej [12]. Ze względu na dużą i stale rosnącą objętość zebranych danych, do ich archiwizacji wykorzystywane są też zasoby Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego. Bardziej szczegółowy opis działania sieci ALPS oraz dokładną lokalizację wszystkich stacji podaje [13].

W tej pracy skupiamy się na ilościowym określeniu stopnia degradacji nocnego nieba w trzech obserwatoriach: Biazków, Piwnice i Sopotnia Wielka. W tych miejscach

zebrano odpowiednio długi ciąg obserwacji, pozwalający na wiarygodną analizę. Stacja ALPS–OST działa od grudnia 2021 roku i zebrany ciąg obserwacyjny jest zbyt krótki. Natomiast stacja ALPS–WRO znajduje się w miejscu, które obecnie nie pełni funkcji obserwatorium astronomicznego.

Analizie poddane zostały następujące dane:

- Pomiar jasności powierzchniowej nieba wykonane fotometrem SQM w okołozenitalnym obszarze nieba z krokiem czasowym wynoszącym 1 minutę. Wykorzystano dane zebrane od początku działania danej stacji. Dane te są podstawą analizy przedstawionej w niniejszej pracy.
- Obrazy nieba wykonywane kamerą ASC z krokiem czasowym od 2 do 5 min. Krok czasowy zależy przede wszystkim od przepustowości łącza internetowego, do którego podłączona jest dana stacja. Obrazy nieba stanowią dane kontekstowe do pomiarów uzyskanych z fotometru.

Kątowa szerokość pola widzenia na połowie maksimum (FWHM) czułości fotometru SQM wynosi  $20^\circ$  [14]. Oś optyczna fotometrów w stacjach ALPS jest skierowana w zenit. Jest to standardowe podejście w pomiarach jasności nieba nocnego, ułatwiające porównanie wyników uzyskanych w różnych lokalizacjach. Dodatkowym uzasadnieniem jest fakt, że dla obserwacji astronomicznych najważniejszy jest obszar nieba znajdujący się bliżej zenitu, powyżej wysokości około  $30\text{--}40^\circ$  nad horyzontem.

W niżej położonej części nieba ekstynkcja atmosferyczna i seeing astronomiczny (rozmycie obrazu obiektów astronomicznych w wyniku turbulencji atmosferycznej) znacząco pogarszają warunki do prowadzenia obserwacji. Zwiększona masa powietrzna na niskich wysokościach nad horyzontem wymusza na obserwatorach wydłużanie czasu ekspozycji, a dodatkowym negatywnym efektem jest ekstynkcja drugiego rzędu, która w rezultacie zmienia i zafałszowuje prawdziwy kolor obiektów astronomicznych. Efekt ten jest trudny, a czasem niemożliwy do usunięcia. Preferowane są obserwacje na większych wysokościach nad horyzontem, najlepiej nie mniejszych niż około  $30\text{--}40^\circ$ . Dokładna wartość zależy w dużym stopniu od warunków lokalnych panujących w danym obserwatorium, przede wszystkim od średniej wilgotności, ilości pyłów zawieszonych i wysokości n.p.m.

Druga istotna informacja związana z pomiarami SQM dotyczy charakterystyki spektralnej tego instrumentu. Szerokość pasma wynosi prawie 240 nm i obejmuje zakres widmowy od 390 nm do prawie 630 nm. Dzięki temu fotometr umożliwia pomiar podwyższonej jasności nieba nocnego wywołanej różnymi źródłami światła antropogenicznego stosowanymi w oświetleniu zewnętrznym, w tym coraz bardziej powszechnymi lampami LED.

Fotometr SQM mierzy powierzchniową jasność nieba w magnitudo na kwadratową sekundę łuku (*magnitudes per square arcsecond*, mpsas). Należy zwrócić uwagę, że skala mpsas jest logarytmiczna i odwrócona – większe wartości oznaczają mniejszą jasność. Jednostka ta nie jest stosowana poza astronomią i może być trudna do interpretacji dla specjalistów z innych dziedzin. Dlatego przy omawianiu wyników stosowana będzie również jednostka naturalnej jasności nieba (nsu – *natural sky unit*). Przyjęto, że wartość 1 nsu odpowiada jasności powierzchniowej 21,9 mpsas i oznacza

niebo bezchmurne, bezksiężycowe przy całkowitym braku zanieczyszczenia światłem [15]. Jasność powierzchniowa odpowiada luminancji w fotometrii oraz radiancji w radiometrii. Istnieje możliwość przeliczenia jasności powierzchniowej wyrażonej w mpsas na luminację wyrażoną w kandelach na metr kwadratowy ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Jest to jednak obciążone niepewnością związaną z tym, że luminacja zdefiniowana jest dla czułości spektralnej oka, która różni się od czułości spektralnej SQM. Z tego powodu przeliczenie to nie będzie stosowane w tej pracy.

Aby umożliwić porównanie pomiarów wykonanych w różnych stacjach, przeprowadzona została interkalibracja fotometrów SQM działających w sieci ALPS. Wszystkie pomiary zostały poprawione na obecność kopuły akrylowej, zabezpieczającej fotometr przed warunkami zewnętrznymi (deszcz, śnieg itd.).

Opady śniegu mogą powodować przykrycie kopuł osłaniających SQM i kamerę, powodując fałszywe zaniżenie mierzonej jasności nieba. Jednak śnieg zalegający na kopułach, dzięki ich kształtowi i podgrzewaniu wnętrza stacji, jest szybko usuwany. Stąd pomiary SQM zaburzone przykryciem kopuł przez śnieg są mało liczne i nie mają istotnego wpływu na przedstawioną tu analizę. Pomiary, które miały kluczowe znaczenie dla końcowych wniosków (np. minimalne zmierzone jasności), a budziły wątpliwość czy aby nie są zaburzone obecnością śniegu na kopule, były weryfikowane obrazami z ASC.

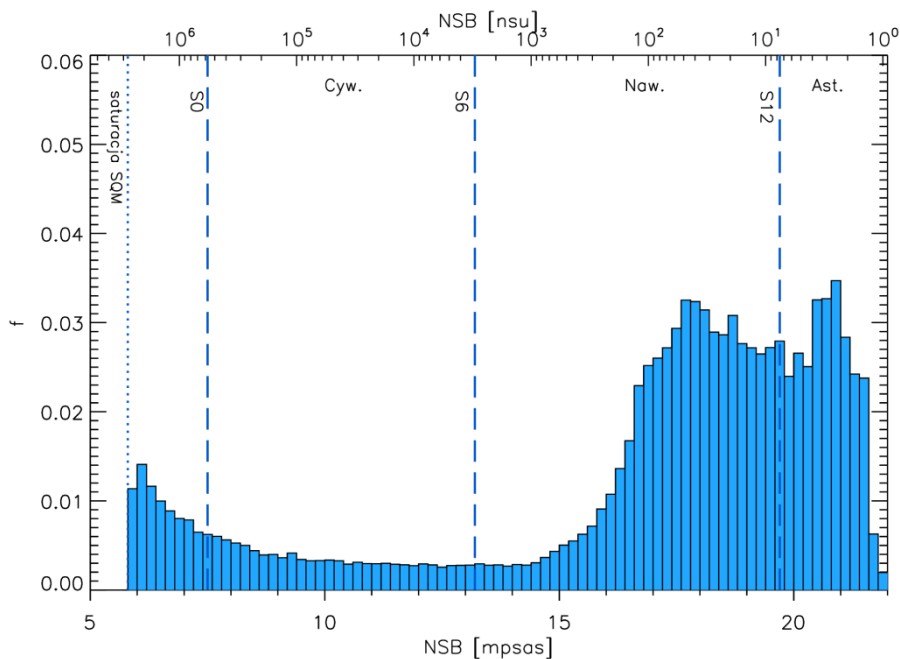
### 3. Analiza danych i wyniki

#### 3.1. Sopotnia Wielka

Obserwatorium Astronomiczne w Sopotni Wielkiej powstało z inicjatywy Stowarzyszenia POLARIS – OPP w 2015 roku. Pełni przede wszystkim funkcję edukacyjną i dydaktyczną. Znajduje się na dachu lokalnej szkoły zlokalizowanej w centralnej części Sopotni Wielkiej, miejscowości liczącej około 2000 mieszkańców. Również dzięki działalności Stowarzyszenia Polaris – OPP w miejscowości rozwijana jest astrofizyka [16]. Stowarzyszenie stara się też od wielu lat aktywnie chronić nocne niebo przed nadmiarem światła antropogenicznego.

W roku 2011 wymieniono w Sopotni Wielkiej oświetlenie uliczne w celu ograniczenia ZŚ w miejscowości. Nowe oprawy oświetleniowe (150 szt.) wyposażone są w lampy HPS (wysokoprężne sodowe) o mocy 50 W i temperaturze barwowej  $< 2500$  K. Oprawy cechują się wskaźnikiem udziału światła wysyłanego ku górze (ULOR) równym zero. Dodatkowo w godzinach 0:00–3:30 CET/CEST oświetlenie uliczne jest wyłączane. Daje to wyjątkową możliwość ilościowej analizy wpływu oświetlenia zewnętrznego znajdującego się w bezpośrednim otoczeniu obserwatorium astronomicznego.





**Rys. 2.** Histogram NSB dla pomiarów otrzymanych ze stacji ALPS–SOP. Linia pionowa kropkowa oznacza poziom saturacji fotometru SQM, linie przerywane – jasność, jaką niebo naturalne bezksiężycowe osiąga o zachodzie/wschodzie Słońca (S0), oraz gdy Słońce jest 6° (S6) i 12° (S12) pod horyzontem. „Cyw.”, „Now.”, „Ast.” oznaczają odpowiednio zmierzch/świt cywilny, nawigacyjny i astronomiczny. Szczegółowy opis histogramu znajduje się w tekście

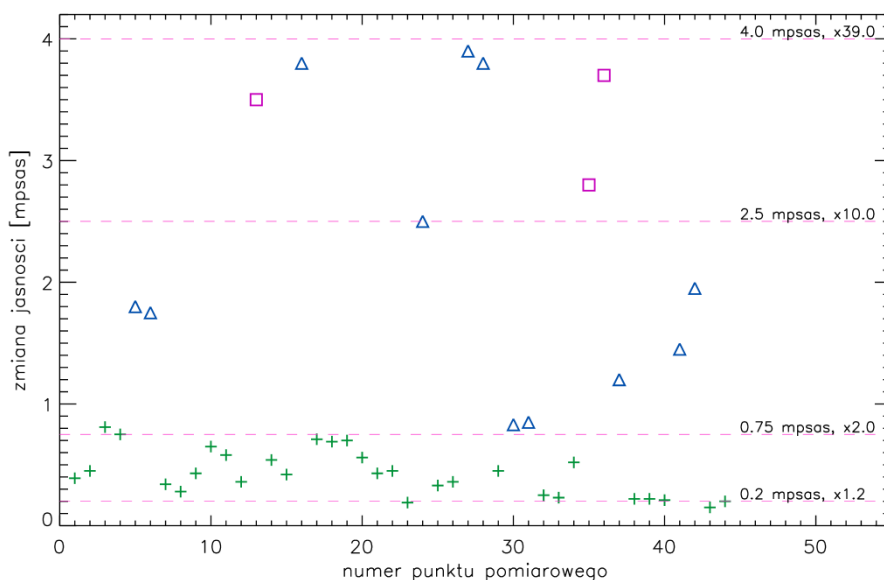
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2 przedstawia histogram jasności nocnego nieba (*Night Sky Brightness*, NSB) wykonany na podstawie dotychczas zebranych pomiarów wykonanych przez stację ALPS–SOP. W lewej części histogramu znajdują się pomiary odnoszące się do zmierzchów i świtów. Pomiarów tych jest względnie mało, ponieważ zmierzch i świt stanowią małą część całej doby. Przy jasnościach większych niż około 6 mpsas (prawie 3 mln nsu) następuje saturacja fotometru SQM, stąd ostre odcięcie histogramu po lewej. W prawej części histogramu gromadzą się pomiary związane z nocami (jasności mniejsze niż około 16 mpsas, 200 nsu). NSB mocno zależy od zachmurzenia, fazy Księżyca i oświetlenia zewnętrznego. Najniższe wartości jasności nieba zmierzone zostały:

- w nocie bezchmurne przy braku Księżyca i wyłączonym oświetleniu zewnętrznym. NSB zawierała się wtedy w przedziale 21,4–21,6 mpsas (1,3–1,6 nsu).
- w nocie z bardzo z niskim, pełnym zachmurzeniem, przy braku Księżyca i wyłączonym oświetleniu zewnętrznym. W tych warunkach NSB była niższa niż 21,6 mpsas (1,3 nsu). Pojedyncze pomiary w takiej nocie mogły osiągać wartości równe jasności naturalnej (1 nsu).

Natomiast najwyższe wartości NSB zarejestrowano:

- w noc bezchmurne około pełni Księżyca jasność nieba osiągała wartość około 18 mpsas (36 nsu). Oświetlenie zewnętrzne w Sopotni Wielkiej nie miało mierzalnego wpływu na jasność nieba w tych warunkach.
- w noc z pełnym zachmurzeniem przy włączonym oświetleniu i obecnej pokrywie śnieżnej jasność nieba sięgała wartości 17 mpsas (91 nsu).



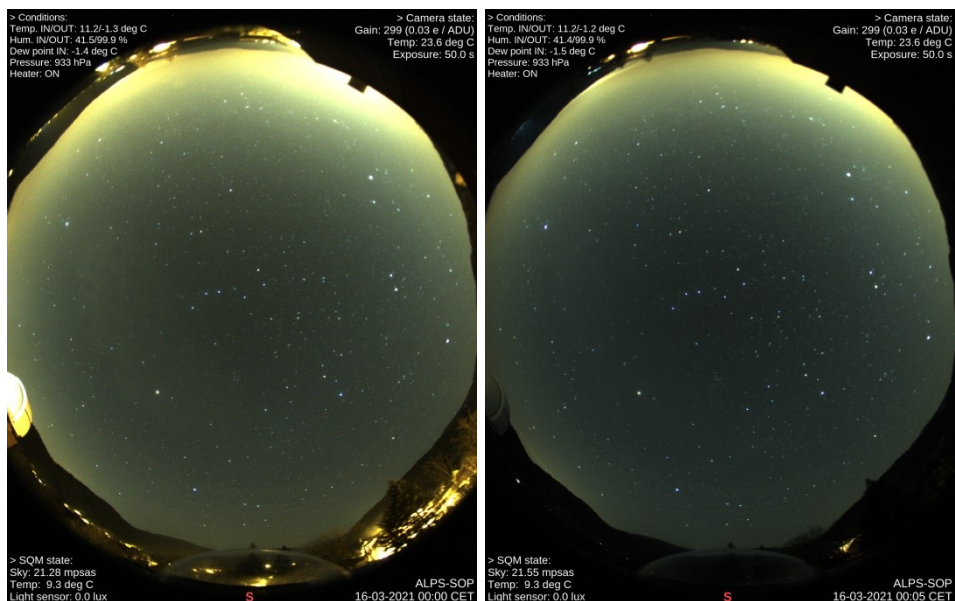
**Rys. 3.** Zmiana jasności NSB w Sopotni Wielkiej wywołana włączaniem i wyłączeniem oświetlenia ulicznego. Szczegółowy opis znajduje się w tekście

*Źródło: opracowanie własne.*

Regularne wyłączenie oświetlenia ulicznego w Sopotni Wielkiej pozwoliło określić jego wpływ na NSB. W tym celu z zebranych pomiarów wybrano ponad 40 przedziałów czasu z różnymi warunkami meteorologicznymi (niebo bezchmurne, całkowicie zachmurzone, mgła), ale przy braku Księżyca. Jeden punkt pomiarowy to zmiana jasności NSB przy wyłączeniu lub włączaniu oświetlenia. Wybór punktów pomiarowych oparto o dane z fotometru i kamery. Warunkiem wyboru danego punktu pomiarowego do tej analizy było to, aby w czasie wyłączenia lub włączania oświetlenia zachmurzenie nie powodowało wyraźnych zmian NSB. Szybko zmienne zachmurzenie uniemożliwia ilościowe określenie zmiany jasności nieba wynikającej z wyłączenia/włączenia oświetlenia. Ten warunek jest szczególnie trudny do spełnienia w noc pochmurne i uniemożliwia wykorzystanie pomiarów z nocy z zachmurzeniem częściowym.

Wyniki analizy przedstawia rysunek 3. Różnymi symbolami oznaczone są punkty pomiarowe z różnymi warunkami zachmurzenia. Symbolem plusa oznaczone są noc bezchmurne, natomiast symbolem trójkąta i kwadratu – odpowiednio noc z całkowitym zachmurzeniem i mgłą. W noc bezchmurne oświetlenie uliczne w Sopotni

Wielkiej zwiększa NSB o 0,20–0,75 mpsas, co jest równoważne wzrostowi 1,2–2,0-krotnemu. W noc z całkowitym zachmurzeniem lub mgłą ten wzrost jest większy i sięga nawet około 4,0 mpsas (wzrost 39-krotny). Dla ilustracji rys. 4 pokazuje dwa obrazy z kamery ASC wykonane jednej nocy tuż przed i tuż po wyłączeniu oświetlenia.



**Rys. 4.** Wygląd nieba w Sopotni Wielkiej przy włączonym i wyłączonym oświetleniu ulicznym. Oba obrazy wykonane z tym samym czasem ekspozycji, tej samej nocy w odstępie 5 min.

Kierunek S jest na dole kadru, kierunek W – po prawej

*Źródło: opracowanie własne.*

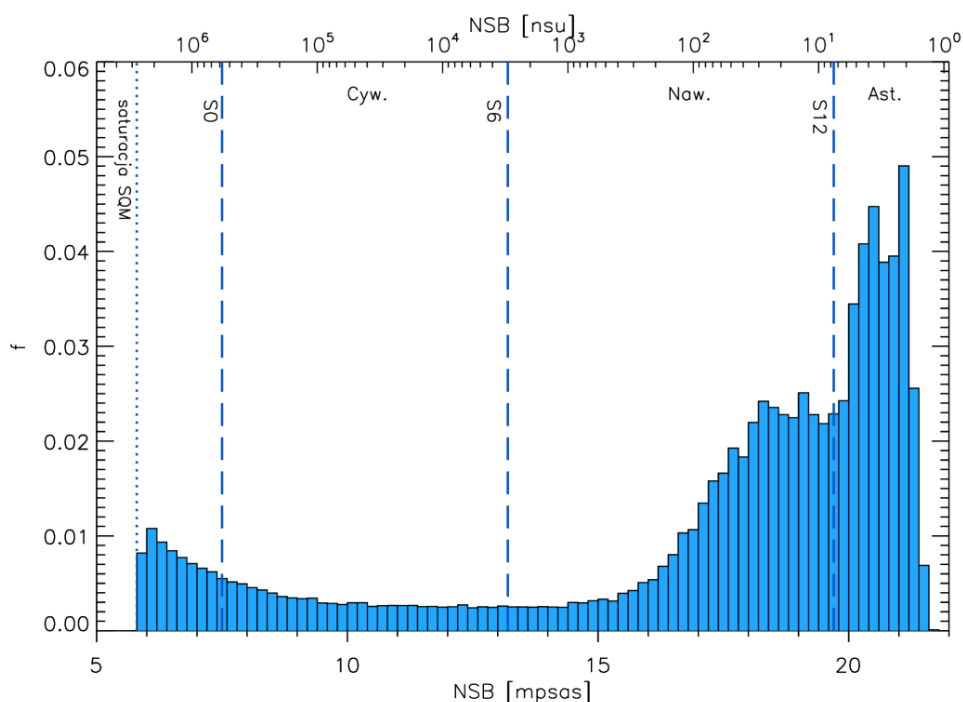
Rysunek 4 pokazuje też, że niebo nocne w Sopotni Wielkiej jest najbardziej zdegradowane w części nad północnym i północno–zachodnim horyzontem. Źródłem zanieczyszczenia światłem są głównie miasta Żywiec i Bielsko-Biała. W pozostałej przyhoryzontalnej części niebo jest wyraźnie mniej zaburzone światłem antropogenicznym.

Stopień degradacji nocnego nieba nad obserwatorium w Sopotni Wielkiej przekracza próg 10% (1,1 nsu) przyjęty przez IAU. Jednak wygaszanie lokalnego oświetlenia ulicznego zmniejsza wyraźnie jasność nieba, zbliżając ją do warunków naturalnych w części bliżej zenitu.

### 3.2. Białków

Obserwatorium Astronomiczne w Białkowie należy do Uniwersytetu Wrocławskiego. Obserwacje w tym miejscu prowadzone są od ponad 100 lat. Powstało jako prywatne obserwatorium miłośnika astronomii Leo Wutschichowsky'ego, a później stało się obserwatorium uniwersyteckim. Białków (gmina Wińsko) jest małą wsią

liczącą mniej niż 20 mieszkańców. Do odległości około 15 km od obserwatorium nie ma żadnych miast, które byłyby większymi źródłami ZŚ. Przy samym obserwatorium znajduje się XIX-wieczny pałac otoczony starym parkiem. W ostatnich latach pałac przeszedł gruntowny remont i znajduje się tu obecnie centrum edukacyjne UWr. Przy okazji remontu w parku zainstalowano oświetlenie zewnętrzne – 21 opraw oświetleniowych LED o mocy 30 W, temperaturze barwowej 2700 K i wskaźniku ULOR = 0. Oświetlenie to może być wyłączane tylko na czas prowadzenia obserwacji. Stało się ono nowym, lokalnie dużym źródłem ZŚ, nie tylko z punktu widzenia astronomicznego, ale również przyrodniczego. Park do tej pory był zupełnie ciemny w nocy. Zaobserwowano, że oświetlenie parkowe przyciąga nocą duże ilości owadów. Wpływ tego oświetlenia na florę i faunę parku wymaga szczegółowego badania. To oczywiście wykracza poza ramy niniejszej analizy.



**Rys. 5.** Histogram NSB dla pomiarów otrzymanych ze stacji ALPS–BIA. Oznaczenia takie same jak na rys. 2. Szczegółowy opis histogramu znajduje się w tekście  
*Źródło: opracowanie własne.*

Rysunek 5 przedstawia histogram jasności NSB wykonany na podstawie pomiarów zebranych przez stację ALPS–BIA. Podobnie jak na analogicznym histogramie dla stacji ALPS–SOP, w lewej części histogramu znajdują się pomiary odnoszące się do zmierzchów i świtów. W prawej części zbierają się pomiary związane z nocami (jasności mniejsze niż około 17 mpsas, 100 nsu). NSB jest zależna od zachmurzenia, fazy Księżyca i oświetlenia parkowego. Najniższe wartości jasności nieba zmierzone zostały:

- w nocy bezchmurnej przy braku Księżyca. NSB zawierała się wtedy w przedziale 21,2–21,5 mpsas (1,4–1,9 nsu).
- w nocy z bardzo niskim, pełnym zachmurzeniem, przy braku Księżyca i braku oświetlenia w parku. Bardzo niskie zachmurzenie odcina Białków od światła antropogenicznego emitowanego przez miejscowości w otoczeniu obserwatorium. W tych warunkach NSB była niższa niż 21,5 mpsas (1,4 nsu). Takich pomiarów jest jednak niewiele.

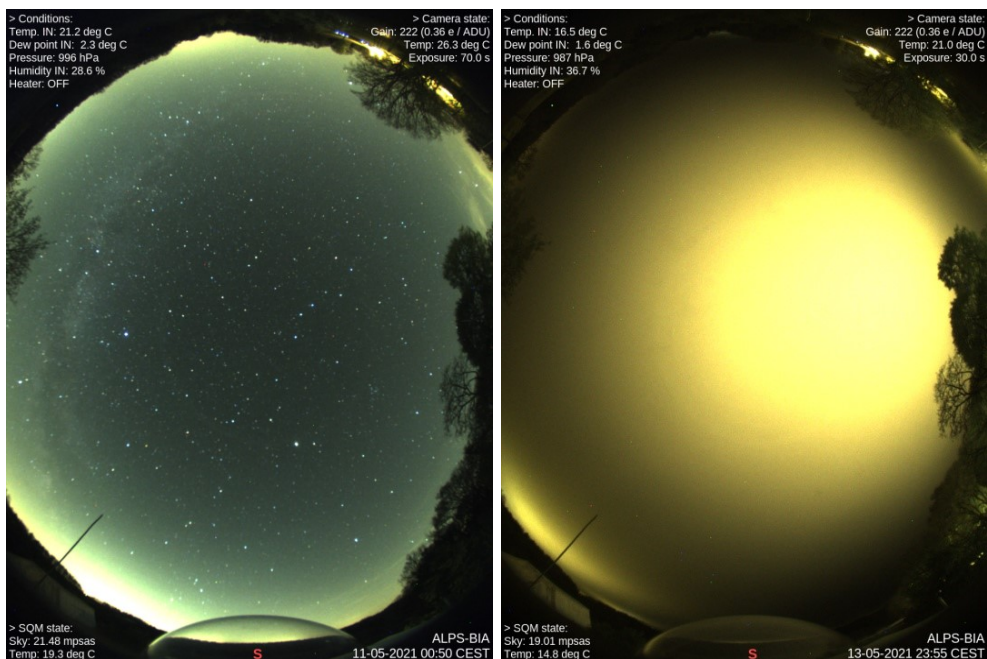
Natomiast najwyższe wartości NSB zarejestrowano dla:

- nocy bezchmurnych około pełni Księżyca, kiedy jasność nieba wynosi około 18 mpsas (36 nsu). Oświetlenie parkowe w tych warunkach nie miało mierzalnego wpływu na jasność nieba.
- nocy z pełnym niskim zachmurzeniem przy włączonym oświetleniu parkowym. Jasność nieba wynosiła wówczas również około 18 mpsas.

Niestety tryb działania oświetlenia parkowego w Białkowie uniemożliwił przeprowadzenie bardziej szczegółowej analizy wpływu tego oświetlenia na NSB, tak jak dla Sopotni Wielkiej. Udało się zebrać jedynie kilka punktów pomiarowych. Z danych tych wynika, że oświetlenie w parku zwiększa NSB o 0,10–0,15 mpsas, co jest równoważne wzrostowi 1,1–1,15-krotnemu. W nocy z całkowitym niskim zachmurzeniem wzrost był większy i sięgał około 0,4 mpsas (wzrost 1,4-krotny). Wpływ oświetlenia parkowego będzie nadal analizowany, również z uwzględnieniem danych z ASC.

Sprawdzono natomiast wpływ tego oświetlenia na warunki obserwacyjne. Stwierdzono, że przy bezchmurnym niebie i obiektach obserwowanych na znacznej wysokości nad horyzontem (ponad 60°), oświetlenie parku nie ma znaczącego wpływu na obserwacje wykonywane teleskopem astrofizycznym. Sytuacja wygląda gorzej przy obecności cienkich chmury typu *Cirrus*, obserwacjach na mniejszych wysokościach czy też wydłużonych ekspozycjach. Wynika stąd, że obecność nawet mało rozbudowanego oświetlenia parkowego w pobliżu obserwatorium, przy braku możliwości jego czasowego wyłączenia, może pogorszyć zauważalnie warunki obserwacyjne.

Rysunek 6 (po lewej) pokazuje obraz wykonany kamerą ASC stacji ALPS–BIA w noc bezchmurną bez Księżyca. W takich warunkach pogodowych najbardziej zdegradowana część nieba znajduje się nad południowo-wschodnim horyzontem. Źródłem tego ZŚ jest Wrocław, którego centrum znajduje się w odległości około 48 km od Białkowa. Nad horyzontem w północnej części nieba widoczne są mniejsze, słabsze obszary rozjaśnienia wywołane przez miasta Rawicz i Leszno. Bliżej zenitu, w najważniejszej części z punktu widzenia prowadzenia obserwacji, niebo jest wyraźnie mniej zaburzone światłem antropogenicznym. Zmierzona okołozenitalna NSB sięgająca prawie 2 nsu jest większa niż wartość progowa przyjęta przez IAU (1,1 nsu). Nadal są to jednak warunki akceptowalne z punktu widzenia badań astronomicznych. Niestety nowe oświetlenie parkowe jest mierzalnym źródłem ZŚ, również bliżej zenitu.



**Rys. 6.** Dwa obrazy nieba z kamery ASC w Białkowie. Po lewej obraz wykonany w noc bezchmurną bez Księżyca. Po prawej obraz wykonany podczas nocy z całkowitym niskim zachmurzeniem i włączonym oświetleniem parkowym. Szczegółowy opis znajduje się w tekście. Kierunek S jest na dole kadru, kierunek W – po prawej

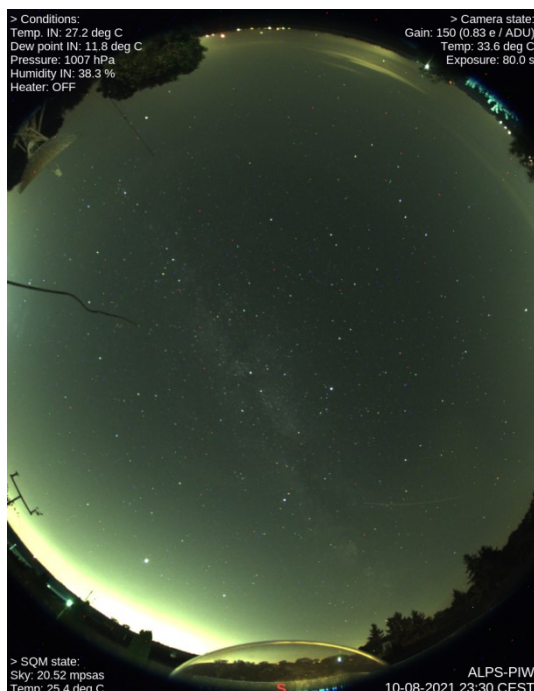
*Źródło: opracowanie własne.*

Rysunek 6. (po prawej) przedstawia obraz z kamery ASC wykonany podczas nocy z całkowitym niskim zachmurzeniem (bez mgły). Nadal widoczne jest rozjaśnienie nieba wywołane przez Wrocław. Jednak w tych warunkach pogodowych najbardziej rozjaśnione jest niebo blisko zenitu. To jest efekt obecności oświetlenia parkowego. O ile wpływ tego oświetlenia na obserwacje astronomiczne jest ograniczony dzięki możliwości jego czasowego wyłączenia, to szczegółowej analizie należałoby poddać wpływ przyrodniczy tego oświetlenia na park i jego otoczenie.

### 3.3. Piwnice

Obserwatorium astronomiczne w Piwnicach należy do Instytutu Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Działa od 1947 roku. Wieś Piwnice (gmina Łysymice) liczy około 300 mieszkańców. Znajdujące się w promieniu 4 km od obserwatorium miejscowości są równie małe i nie są dużym źródłem ZŚ. Głównym źródłem tego zanieczyszczenia jest Toruń, którego centrum znajduje się w odległości niecałych 10 km od obserwatorium. Wyspa świetlna Torunia ma promień około 12–13 km [4]. Jasność nocnego nieba w Piwnicach będzie więc pod dużym wpływem światła

antropogenicznego emitowanego przez Toruń. Rysunek 7 przedstawia przykładowy obraz z kamery ASC stacji ALPS–PIW z nocy bezchmurnej i bezksiężycowej. Silne rozjaśnienie widoczne w południowo–wschodniej części nieba wywołane jest przez Toruń. Warto dodać, że niebo nad północnym horyzontem jest mało rozjaśnione przez ŻŚ i w znaczącej części nieprzesłonięte przez przeszkody terenowe. Daje to możliwość rejestracji zórz polarnych.



**Rys. 7.** Przykładowy obraz z kamery ASC w Piwnicach z nocy bezchmurnej i bezksiężycowej. Szczegółowy opis znajduje się w tekście. Kierunek S jest na dole kadru, kierunek W – po prawej  
*Źródło: opracowanie własne.*

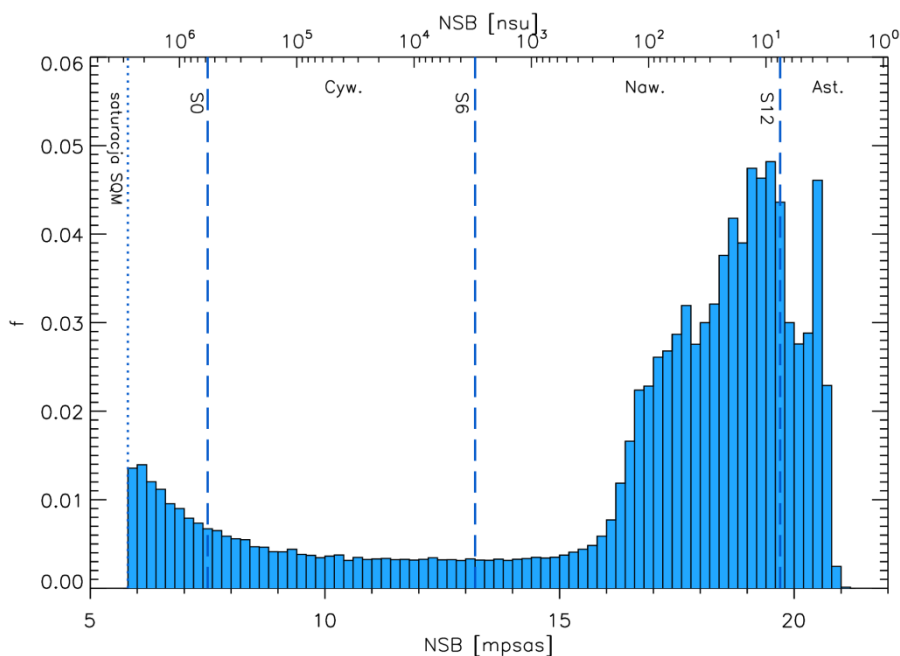
Na rysunku 8 przedstawiony jest histogram jasności NSB wykonany na podstawie pomiarów wykonanych przez stację ALPS–PIW. Pomiarów zgromadzone w czasie nocy znajdują się w prawej części histogramu (jasności mniejsze niż ok. 17 mpsas, 100 nsu). Poza istotnym wpływem bliskości Torunia NSB jest zależna od zachmurzenia i fazy Księżyca. Najniższe wartości jasności nieba zmierzone zostały:

- w nocy bezchmurne przy braku Księżyca. W tych warunkach NSB zawierała się w przedziale 20,4–21,0 mpsas (2,3–4,0 nsu).

Dla większości nocy jasność nieba zawiera się w przedziale 19–20 mpsas (6–14 nsu). Są to zarówno nocy bezchmurne o słabej przejrzystości powietrza, jak i nocy z lekkim zachmurzeniem. Natomiast najwyższe wartości NSB zarejestrowano dla:

- nocy bezchmurnych około pełni Księżyca, kiedy jasność nieba wynosiła około 18 mpsas (36 nsu).

Obrazy z kamery ASC wskazują, że kilka wsi w pobliżu obserwatorium wyłącza oświetlenie w godzinach 0:00–4:00 CET/CEST. Jednak wpływ tego wygaszania na NSB jest niemierzalny. Istotniejsze może być oświetlenie zewnętrzne znajdujące się na terenie obserwatorium. Starego typu oprawy cechują się wysokim wskaźnikiem ULOR i wyposażone są w źródła światła białego (być może lampy rtęciowe). Niestety nie są one nigdy wyłączone w nocy, więc ich wpływu na NSB na razie nie udało się zbadać. Badanie takie jest zaplanowane na najbliższą przyszłość, po uzgodnieniu szczegółów technicznych z Instytutem Astronomii UMK.



**Rys. 8.** Histogram NSB dla pomiarów otrzymanych ze stacji ALPS–PIW. Oznaczenia takie same jak na rys. 2. Szczegółowy opis histogramu znajduje się w tekście

*Źródło: opracowanie własne.*

## 4. Wnioski

Nocne niebo jest kluczowym zasobem naukowym dla astronomii. Dostęp do niego jest warunkiem koniecznym dla prowadzenia badań astronomicznych. Pomimo wzrastającej roli badań prowadzonych z przestrzeni kosmicznej, obserwatoria naziemne nadal odgrywają, i w najbliższej przyszłości będą odgrywać, ważną rolę.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę danych zgromadzonych przez stacje ALPS w trzech obserwatoriach astronomicznych: Sopotnia Wielka, Białków i Piwnice. We wszystkich obserwatoriach stwierdzono, że jasność powierzchniowa nocnego nieba przekracza poziom 1,1 nsu, który IAU uznaje za wartość graniczną pomiędzy niebem naturalnym i zanieczyszczonym światłem, z punktu widzenia astronomii. Powyżej tej granicy rozjaśnienie nieba przez światło antropogeniczne staje się utrudnieniem dla



dużych profesjonalnych obserwatoriów. Z analizy danych wynika, że we wszystkich trzech obserwatoriach ta graniczna jasność jest przekroczona i w najlepszych warunkach wynosi 1,3–1,6 nsu (Sopotnia Wielka), 1,4–1,9 nsu (Białków) i 2,3–4,0 nsu (Piwnice). Wspomniane trzy obserwatoria nie należą do dużych obserwatoriów, jednak nadal odgrywają ważną rolę w prowadzeniu badań naukowych (Białków, Piwnice) oraz edukacji (Sopotnia Wielka).

Ciekawą kwestią jest to, jak warunki obserwacyjne w polskich obserwatoriach wypadają w porównaniu nie tylko do nieba wolnego od ZŚ, ale też do warunków istniejących w największych światowych obserwatoriach położonych np. w Chile, na Wyspach Kanaryjskich i Hawajach. Tego typu porównanie nie jest jednak proste. Jasność tła nocnego nieba w tego typu obserwatoriach wyznaczana jest z użyciem standardowych astronomicznych systemów fotometrycznych, w szczególności UBVRI. Każdy z pięciu filtrów tego systemu ma charakterystykę spektralną różniącą się od charakterystyki spektralnej SQM, przez co nie jest możliwe podanie prostej formuły umożliwiającej wiarygodną konwersję z SQM do np. filtra V. Z tego powodu do wspomnianego porównania użyto wyników pomiarów NSB wykonanych w obserwatorium San Pedro Martir [15].

Obserwatorium to znajduje się w paśmie Sierra de San Pedro Mártir w Meksyku. Nocne zdjęcia satelitarne oraz modelowe mapy ZŚ [4] wskazują, że niebo na tym obserwatorium jest wolne od ZŚ. W latach 2013–2016 przeprowadzono tam pomiary jasności nieba z jednoczesnym użyciem systemu fotometrycznego UBVRI oraz fotometru SQM. Wyniki pomiarów wykonane w systemie UBVRI wskazują, że NSB w tej lokalizacji jest podobna do warunków panujących w największych światowych obserwatoriach. A jednoczesne pomiary wykonane z wykorzystaniem fotometru SQM pozwalają na porównanie warunków obserwacyjnych w analizowanych w niniejszej pracy obserwatoriach polskich z niebem wolnym od ZŚ i ze światowej klasy obserwatoriami.

Istotnym elementem tego porównania jest to, że w warunkach naturalnych jasność nocnego nieba zależy m.in. od aktywności Słońca. Z pomiarów SQM przeprowadzonych w obserwatorium San Pedro Martir wynika, że w czasie minimum aktywności niebo osiąga jasność najniższą, wynoszącą około 21,9 mpsas, która przyjęta jest w niniejszej pracy jako 1 nsu. Natomiast w czasie maksimum aktywności jasność ta rośnie do około 21,4 mpsas, co odpowiada około 1,6 nsu. Można zatem uznać, że niebo nocne bez ZŚ może mieć jasność w przedziale 1,0–1,6 nsu. Jednocześnie można przyjąć ten zakres jako typową wartość NSB dla największych światowych obserwatoriów. Porównując ten zakres z jasnościami wyznaczonymi w trzech badanych obserwatoriach, można wyciągnąć następujące wnioski:

- Niebo nocne w obserwatorium w Sopotni Wielkiej, w części bliżej zenitu, ma jasność zbliżoną do naturalnej. Istotną rolę odgrywa w tym czasowe wyłączenie oświetlenia ulicznego w tej miejscowości.
- W obserwatorium w Białkowie niebo jest na granicy przyjętego przedziału naturalnego. Mierzalną przyczyną pogorszenia jego jakości stało się oświetlenie parkowe. Szacowany wzrost jasności wywołany tym oświetleniem wynosi około 10% (0,1 mpsas).

- W obserwatorium w Piwnicach jasność nocnego nieba, nawet w najlepszych warunkach pogodowych, jest większa niż dla nieba wolnego od ZŚ. Główną przyczyną tego jest bliskość Torunia. Nie zbadano na razie ilościowo, jaki wpływ ma oświetlenie zewnętrzne zainstalowane na terenie obserwatorium.

Należy dodać, że dane ALPS, które wykorzystano w analizie, zostały zebrane w latach 2018–2021, czyli w okresie niskiej aktywności Słońca.

Wyniki uzyskane dla trzech rozważanych tu obserwatoriów można też porównać z jasnością nieba w dużych miastach, reprezentujących obszary najbardziej zanieczyszczone światłem, w których profesjonalne obserwacje astronomiczne są praktycznie niemożliwe. Do tego porównania można użyć danych zebranych przez stację ALPS–WRO. W bezchmurne noce przy braku Księżyca jasność osiąga tu wartość minimalną wynoszącą 19,0–19,3 mpsas (11,0–14,5 nsu). Stacja znajduje się prawie 4 km od centrum Wrocławia, dlatego należy oczekiwać, że pomiar wykonany bliżej centrum wykazałby większą jasność nieba. Wyniki modelu NSB bazującego na danych satelitarnych [4] sugerują, że w centrum Wrocławia jasność nieba jest około dwukrotnie większa niż w lokalizacji stacji ALPS–WRO, czyli zawierałaby się w przedziale 20–30 nsu. Podobnych wartości NSB należy oczekiwać dla innych największych miast w Polsce [4]. Oznacza to, że jasność nieba w badanych obserwatoriach jest mniejsza około 10-krotnie.

Prezentowane tu wyniki mogłyby też posłużyć do obserwacyjnej weryfikacji modeli NSB bazujących na danych satelitarnych, np. modelu przedstawionego w pracy [4]. W modelach tych jasność nieba obliczana jest zwykle dla filtra V systemu fotometrycznego UBVR1, w zenicie dla bezchmurnego, bezksiężycowego nieba. Można te obliczenia odnieść do najniższych wartości NSB zmierzonych w Białkowie, Piwnicach i Sopotni Wielkiej. Porównanie takie wskazuje, że różnice nie przekraczają 0,4 mpsas (około 40%). Interpretacja tej różnicy jest jednak trudna a wnioski byłyby mocno wątpliwe, ponieważ porównujemy tu jasności dla filtra V i SQM, co jest problematyczne, jak to opisano powyżej.

Obserwacje ALPS wykonane w Sopotni Wielkiej i Białkowie pokazują wyraźny wpływ oświetlania zewnętrznego obecnego w bezpośrednim sąsiedztwie obserwatorium na jasność nieba w obszarze bliższym zenitowi, który jest najważniejszy z punktu widzenia obserwacji astronomicznych. Wniosek stąd jest taki, że obserwatoria astronomiczne powinny mieć jakąś możliwość kontrolowania parametrów oświetlenia zewnętrznego znajdującego się w ich pobliżu, również tego, które nie jest ich własnością. Obecnie w polskim prawie brakuje skutecznych narzędzi, które mogłyby wykorzystać obserwatoria do ochrony warunków obserwacyjnych przed zanieczyszczeniem światłem. W praktyce wskazane byłoby wyznaczenie dookoła obserwatoriów stref ochronnych, w których oświetlenie musiałoby spełniać wymogi pozwalające minimalizować ZŚ.

W 2020 roku powstał raport omawiający wpływ ZŚ na obserwacje astronomiczne i możliwości zapobiegania temu problemowi [5]. W raporcie wskazano, że pilnie konieczna jest ochrona obserwatoriów astronomicznych przez ZŚ. Na bazie dotychczasowych doświadczeń i możliwości technicznych zaproponowano szereg

wymogów dla oświetlenia zewnętrznego znajdującego się w pobliżu obserwatoriów. Wśród nich są, m.in.:

- stosowanie opraw oświetleniowych o wskaźniku ULOR = 0,
- używanie źródeł światła, w których widmie emisji mocno ograniczona jest składowa niebieska (<500 nm),
- wprowadzenie kontroli czasowej, czyli okresów w ciągu nocy, kiedy oświetlenie jest wygaszane, lub zmniejszana jest jego jasność (przy spełnieniu wymogów bezpieczeństwa),
- unikanie sytuacji, w których światło z opraw oświetleniowych jest bezpośrednio kierowane w stronę obserwatorium.

Możliwość utworzenia wokół polskich obserwatoriów stref ochronnych, w których oświetlenie podlegałoby pewnym zdroworozsądkowym ograniczeniom, takim jak podane powyżej, mogłoby spowolnić lub zatrzymać stale postępujące pogarszanie się warunków obserwacyjnych, a może nawet je poprawić. Do tego potrzebne jest jednak stworzenie odpowiednich regulacji prawnych, pozwalających na wprowadzenie nie tylko możliwości tworzenia stref ochronnych dla obserwatoriów. W szerszym ujęciu potrzebne jest również zaistnienie lepszej, racjonalnej, polityki oświetleniowej w Polsce, dzięki której będzie możliwe korzystanie z tego ważnego osiągnięcia cywilizacyjnego, jakim jest oświetlenie elektryczne, przy jednoczesnym minimalizowaniu jego negatywnego oddziaływania na m.in. przyrodę i astronomię.

## Podziękowanie

Obliczenia i archiwizację danych wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe.

## Literatura

- [1] Sanders D., Frago E., Kehoe R., Patterson Ch., Gaston K. J., *A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night*, Nature Ecology & Evolution, 2021, 5, s. 74–81.
- [2] Bará S., *Anthropogenic disruption of the night sky darkness in urban and rural areas*, Royal Society Open Science, 2016, 3, 160541.
- [3] Ścieżor T., *Naturalne i antropogeniczne czynniki łuny świetlnej nocnego nieba*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2018.
- [4] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, 2016, 2, e1600377.
- [5] *Dark and Quiet Skies for Science and Society. Report and recommendations*, <https://www.iau.org/static/publications/dqskies-book-29-12-20.pdf> (dostęp: 1.03.2022).
- [6] Bennie J., Davies T., Duffy J., Inger R., Gaston K., *Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights*, Scientific Reports, 2014, 4, art. 3789.

- [7] Sánchez de Miguel A., Bennie J., Rosenfeld E., Dzurjak S., Gaston K.J., (), *First Estimation of Global Trends in Nocturnal Power Emissions Reveals Acceleration of Light Pollution*, *Remote Sensing*, 2021, 13, s. 3311.
- [8] Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
- [9] Crawford, D. L., *Light pollution, an environmental problem for astronomy and for mankind*, *Memorie della Società Astronomia Italiana*, 2000, 71, s. 11.
- [10] Kołomański S., Wiernasz A., Borodacz K., Białek R., Mikołajczyk P., *ALPS – stacje obserwacyjne zanieczyszczenia światłem*, [w:] *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, A.Z. Kotarba (red.), Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2019, s. 153–165.
- [11] Pracownia Monitoringu Zanieczyszczenia Światelnego Politechniki Krakowskiej, <http://lightpollution.pk.edu.pl> (dostęp: 1.03.2022).
- [12] All-Sky Light Pollution Survey, <http://alps.astro.uni.wroc.pl/> (dostęp: 1.03.2022).
- [13] Mikołajczyk P., Kołomański S., Kotysz K., Markiewicz A., Łojko P., Wiernasz A., (2022), *Teraźniejszość i przyszłość projektu ALPS*, [w:] *Sztuczne światło nocą – między zagrożeniem a rozwojem*, P. Tabaka (red.), Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, s. 219-232.
- [14] Cinzano, P., *Night sky photometry with sky quality meter*, ISTIL Internal Report n. 9, v.1.4, ISTIL, Thiene, 2005.
- [15] Plauchu-Frayn I., Richer M.G., Colorado E., Herrera J., Córdova A., Ceseña U., Ávila F., *Night Sky Brightness at San Pedro Martir Observatory*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2017, 973, s. 1–13.
- [16] Nawalkowski P., Konior J., *Dark Sky Community Sopotnia Wielka – pierwsza społeczność czynnej ochrony ciemnego nieba w Polsce. Wnioski i waloryzacja działań 10 lat po modernizacji oświetlenia przestrzeni publicznej*, [w:] *Sztuczne światło nocą – między zagrożeniem a rozwojem*, P. Tabaka (red.), Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2022, s. 247-273.

## THE QUALITY OF THE NIGHT SKY IN ASTRONOMICAL OBSERVATORIES BASED ON MONITORING BY THE ALPS NETWORK

**Abstract:** Poland is a country with high and increasing light pollution. For astronomy, the quality of the night sky, which can be significantly affected by light pollution is crucial to the conduct of scientific research.

ALPS is a network of automatic stations designed for continuous monitoring of the sky. The stations record images of the entire sky and measure its brightness. At present, they are mainly located in astronomical observatories. The main goal of the project is to study the brightness of the night sky, taking into account meteorological conditions, and to track changes and sources of light pollution.

Based on the ALPS data collected so far, the degree of night sky degradation in the astronomical observatory in Białków, the astronomical observatory in Piwnice and the astronomical observatory in Sopotnia Wielka was determined. The results obtained show that urgent measures are needed to protect the night sky over astronomical observatories in Poland.

**Keywords:** light pollution, astronomical observatories, the brightness of the night sky

# ROZWÓJ SIECI OBSERWACYJNEJ ALPS

## Przemysław J. Mikołajczyk

Instytut Astronomiczny, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Wrocławski  
Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski  
*mikolajczyk@astro.uni.wroc.pl*

## Sylwester Kołomański

Krzysztof Kotysz

Adam Markiewicz

Piotr Łojko

Instytut Astronomiczny, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Wrocławski

## Adam Wiernasz

Polskie Towarzystwo Miłośników Astronomii, Oddział Wrocławski

**Streszczenie:** Przedstawiamy rozwój, działanie i cele projektu ALPS. Projekt skupiony jest na monitorowaniu poziomu zanieczyszczenia światłem na terenie Polski, a w szczególności w obserwatoriach astronomicznych. W tym celu gromadzone są dane numeryczne w postaci jasności powierzchniowej nieba mierzonej w okolicach zenitu oraz wykonywane są obrazy całego nieba. Dzięki tak prowadzonym pomiarom możliwa jest ilościowa ocena stopnia degradacji nocnego nieba przez światło antropogeniczne. Powoduje ono wzrost jasności nieba, a przez to spadek jakości obserwacji, czyli badań naukowych w dziedzinie astronomii. Kontrola i ograniczanie zanieczyszczenia światłem jest więc koniecznością z punktu widzenia astronomii. Sieć stacji obserwacyjnych ALPS jest elementem, który może wesprzeć te działania.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, jasność nieba, obserwacje astronomiczne

## 1. Wstęp

Projekt ALPS (ang. *All-Sky Light Pollution Survey* – pol. Przegląd Zanieczyszczenia Światłem Całego Nieba) zajmuje się zbieraniem danych na temat zanieczyszczenia nieba sztucznym światłem. Źródłem tego zanieczyszczenia jest głównie infrastruktura oświetlenia zewnętrznego, tj.: oświetlenie użytkowe (np.: drogowe, sportowe, terenów przemysłowych, reklamowe) oraz oświetlenie architektoniczne budynków, konstrukcji i elementów krajobrazu.

W wielu krajach, również w Polsce, ilość infrastruktury oświetlenia zewnętrznego stale wzrasta [1]. Przekłada się to na wzrost zanieczyszczania światłem (ZŚ), które przejawia się m.in. sztucznym zwiększeniem jasności nocnego nieba [2]. Aby monitorować zmiany tego zanieczyszczenia i skutecznie im przeciwdziałać należy mierzyć jasność powierzchniową nieba za pomocą odpowiednio czułego fotometru, w ściśle ustalonych jednostkach i z dobrą rozdzielczością czasową [3]. Dodatkowo przydatne mogą być obrazy nieba, których moment wykonania zbiega się z momentem fotometrycznego pomiaru jasności powierzchniowej nieba. Dzięki temu uzyskujemy o wiele pełniejszą informację na temat poziomu zanieczyszczenia światłem, ponieważ oprócz jednowymiarowej danej liczbowej otrzymujemy także obraz, który niesie ze sobą wiedzę m.in. o stanie lokalnego zachmurzenia w chwili pomiaru oraz pomaga w niedługim czasie zlokalizować źródła nadmiernego oświetlenia nieba. Monitorowanie infrastruktury oświetlenia zewnętrznego za pomocą danych satelitarnych, np. dostarczanych przez Suomi NPP [4], nie daje bezpośredniej informacji o efekcie, jaki źródła sztucznego światła wywierają na jasność nieba. Problemem jest tu również fakt, że satelita ten nie wykazuje czułości na światło o długości fali mniejszej niż 500 nm oraz ma niewielką rozdzielczość czasową. Dlatego pomiary naziemne są istotne z punktu widzenia określania poziomu ZŚ.

Zanieczyszczenie światłem ma znaczący wpływ na funkcjonowanie wielu organizmów żywych i całego ekosystemu [5]. Na potrzeby tego opracowania skupimy się jednak na aspekcie ludzkim, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu sztucznego światła na możliwość i jakość wykonywania profesjonalnych badań naukowych w zakresie astronomii. Głównym nośnikiem informacji o obiektach astronomicznych było i nadal jest promieniowanie elektromagnetyczne, w tym światło. Dodatkowo większość z tych obiektów jest bardzo odległa od Ziemi, przez co są to bardzo słabe źródła w sensie małej ilości docierającego do nas promieniowania. Z tego powodu obserwacje astronomiczne są wrażliwe na wszelkie źródła zakłócające rejestrację promieniowania pochodzącego od obiektów kosmicznych, np. antropogeniczną emisję światła i fal radiowych [6].

Do końca XIX w. obserwacje astronomiczne nie napotykały na znaczące utrudnienia związane z rozwojem cywilizacyjnym. Wręcz przeciwnie, rozwój ten dostarczał astronomii nowych narzędzi do prowadzenia badań, a wśród najważniejszych jest m.in. teleskop i fotografia. Elektryfikacja miast i powszechniejsze użytkowanie oświetlenia zewnętrznego, zapoczątkowane w drugiej połowie wieku XIX, przyniosły istotne zmiany w warunkach prowadzenia obserwacji astronomicznych. Oprócz

warunków pogodowych, istotne znaczenie miało usytuowanie samych obserwatoriów. Koniecznym stało się budowanie ich z dala od osad ludzkich, szczególnie dużych, szybko rozwijających się miast, takich jak Londyn, Berlin, Paryż czy Warszawa. Nierzadko, obserwatoria, które powstały w okresie przypadającym na przełom wieków XIX i XX, dzisiaj zlokalizowane są w granicach dużych aglomeracji, czyli na obszarach o bardzo wysokim poziomie zanieczyszczenia światłem.

Od około połowy XX w., dzięki wprowadzeniu do powszechnego użytku lamp wyładowczych o dużej skuteczności świetlnej [7], proces pogarszania się warunków obserwacyjnych wyraźnie przyspieszył. Doprowadziło to do sytuacji, w której naukowe obserwacje astronomiczne są nie tylko niemożliwe z miast i ich bliskiego otoczenia, ale też z prawie całych państw. Skrajnym przykładem są tu Belgia i Holandia, których tereny zanieczyszczone są światłem w takim stopniu, że z około połowy ich powierzchni nie sposób dostrzec Drogi Mlecznej, nawet w bezksiężycową, pogodną noc [2]. Taka sytuacja wymusiła na naukowcach lokalizowanie obserwatoriów astronomicznych w miejscach odległych od cywilizacji, a jednocześnie cechujących się dobrymi warunkami pogodowymi i wysoką przejrzystością atmosfery. To właśnie z tych trzech powodów wszystkie profesjonalne obserwatoria astronomiczne planowane i konstruowane są dzisiaj na terenie Chile, krajów południowej Afryki czy Australii. W Europie najlepszą lokalizacją są Wyspy Kanaryjskie i mniej zaludnione tereny Hiszpanii, ale w miarę wzrostu poziomu ZŚ i one będą musiały prawdopodobnie ustąpić pola innym lokalizacjom.

Sytuacja spowodowana wysokim poziomem ZŚ jest dla astronomii obserwacyjnej bardzo trudna [6], ale jak pokazuje praktyka, także na poziomie naszego kraju [8], możliwe jest zatrzymanie ekspansji światła antropogenicznego, a nawet odwrócenie tego groźnego trendu. Elementem kluczowym dla osiągnięcia tego celu wydaje się zwiększenie świadomości o problemie ZŚ wśród zwykłych ludzi, a następnie podjęcie działań legislacyjnych pozwalających zredukować to zanieczyszczenie. W pierwszej kolejności ochroną powinny zostać objęte okolice istniejących już obserwatoriów astronomicznych oraz obszary cenne przyrodniczo, np. parki narodowe. Jednym z elementów przeciwdziałania negatywnemu wpływowi ZŚ na astronomię jest monitoring tego zanieczyszczenia w obserwatoriach astronomicznych.

## 2. Projekt ALPS

### 2.1. Cele projektu

Projekt ALPS zorientowany jest na osiągnięcie następujących celów:

- określenie poziomu zanieczyszczenia światłem oraz śledzenie jego zmian,
- identyfikacja źródeł zanieczyszczenia światłem,
- wsparcie dla obserwatorów nocnego nieba (ułatwienie w określaniu warunków meteorologicznych),



- popularyzacja problemu degradacji jakości nocnego nieba wskutek zanieczyszczenia światłem.

Obecnie prowadzone badania skoncentrowane są na obserwatoriach astronomicznych. Dane niezbędne do osiągnięcia powyższych celów są zbierane przez automatyczne stacje pomiarowe. Wykonywane są dwa rodzaje obserwacji: obrazy barwne (RGB) całego nieba i jednokanałowe pomiary fotometryczne jasności powierzchniowej nieba. Zbieranie danych odbywa się w sposób ciągły, niezależnie od pory dnia i roku oraz warunków meteorologicznych.

Oprócz wymienionych wyżej celów, projekt pozwala również na popularyzację astronomii. Dzięki dostarczającym na bieżąco materiałom możliwe jest łatwe i przystępne prezentowanie wyglądu nocnego nieba w różnych lokalizacjach geograficznych, w różnych warunkach pogodowych oraz w różnych momentach. Możliwe jest wykorzystanie danych ALPS (obrazów) jako materiału wspomagającego naukę podstawowych zjawisk zachodzących na sferze niebieskiej.

## 2.2. Krótka historia projektu

W 2009 roku sześć instytucji, w tym Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego (IA UWr), powołało do istnienia polsko-czeski park ciemnego nieba w Górach Izerskich [9]. Jednym z działań przewidzianych do realizacji w ramach Izerskiego Parku Ciemnego Nieba (IPCN) był monitoring stanu nocnego nieba na terenie parku.

Początkowo IA UWr planował utworzenie dwóch stacji monitoringu nieba. Jedna miała znajdować się w IPCN, druga we Wrocławiu. Dzięki wcześniejszemu zaangażowaniu naukowców z IA UWr w problematykę zanieczyszczenia światłem przy realizacji projektów popularnonaukowych Astro Izery oraz Wygasz [10, 11, 12], Instytut dysponował już w pełni funkcjonalną profesjonalną kamerą All-Sky marki SBIG, popularną także wśród profesjonalnych astronomów, oraz automatycznymi fotometrami SQM (*Sky Quality Meter*).

Projekt zaczął być szybko rozwijany od roku 2016. Intensyfikacja prac nad projektem była wynikiem nawiązania współpracy IA UWr z wrocławskim oddziałem Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii (PTMA). Dzięki temu w lipcu 2017 uruchomiona została stacja obserwacyjna we Wrocławiu (ALPS–WRO). Pod koniec października tego samego roku stacja przesyłała już obrazy z 5–minutowym krokiem czasowym a pomiary za pomocą fotometru były wykonywane co minutę. Całość można było śledzić na specjalnie do tego celu stworzonej stronie umieszczonej na serwerze wrocławskiego oddziału PTMA. W międzyczasie zespół projektu ALPS planował uruchomienie kolejnej stacji, która miała być zlokalizowana na terenie osiedla Orle, położonego na obszarze IPCN. Obrazy i dane fotometryczne z obu stacji, zlokalizowanych w tak różnych pod względem ZS miejscach, miały w założeniu być cennym materiałem naukowym i popularyzatorskim, pokazującym, w jakim stopniu zdegradowane jest niebo w osadach ludzkich, a szczególnie w dużych miastach.

Doświadczenia zdobyte przy budowie i użytkowaniu pierwszej stacji ALPS przyniosły duże zmiany w koncepcji konstrukcji kolejnych. Pierwsza stacja (rys. 1) składała się z trzech fizycznie oddzielnych modułów: fotometru SQM umieszczonego w obudowie chroniącej go przed warunkami pogodowymi, kamery SBIG Allsky 340c umieszczonej w fabrycznej obudowie oraz komputera sterującego typu Raspberry Pi znajdującego się wewnątrz budynku. Konstrukcja taka miała szereg wad, m.in. małą odporność na niekorzystne warunki meteorologiczne, np. niskie temperatury, opady śniegu i wysoka wilgotność. Dlatego zdecydowano się skonstruować stację, której wszystkie elementy umieszczone byłyby w jednej, hermetycznie szczelnej obudowie.

Pierwsza tak skonstruowana stacja uruchomiona została w lipcu 2018 roku w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Wrocławskiego w Białkowie. Oprócz standardowych przyrządów pomiarowych (fotometr i kamera), nowa stacja została wyposażona w moduły mierzące wewnętrzną temperaturę i wilgotność powietrza oraz zapasowe źródło zasilania w postaci akumulatora, który zapewniał około 8 godzin pracy bez dostępu do sieci energetycznej. Zrezygnowano też z wykorzystywania kamer SBIG, na rzecz lepszej jakości kamer marki ZWO.

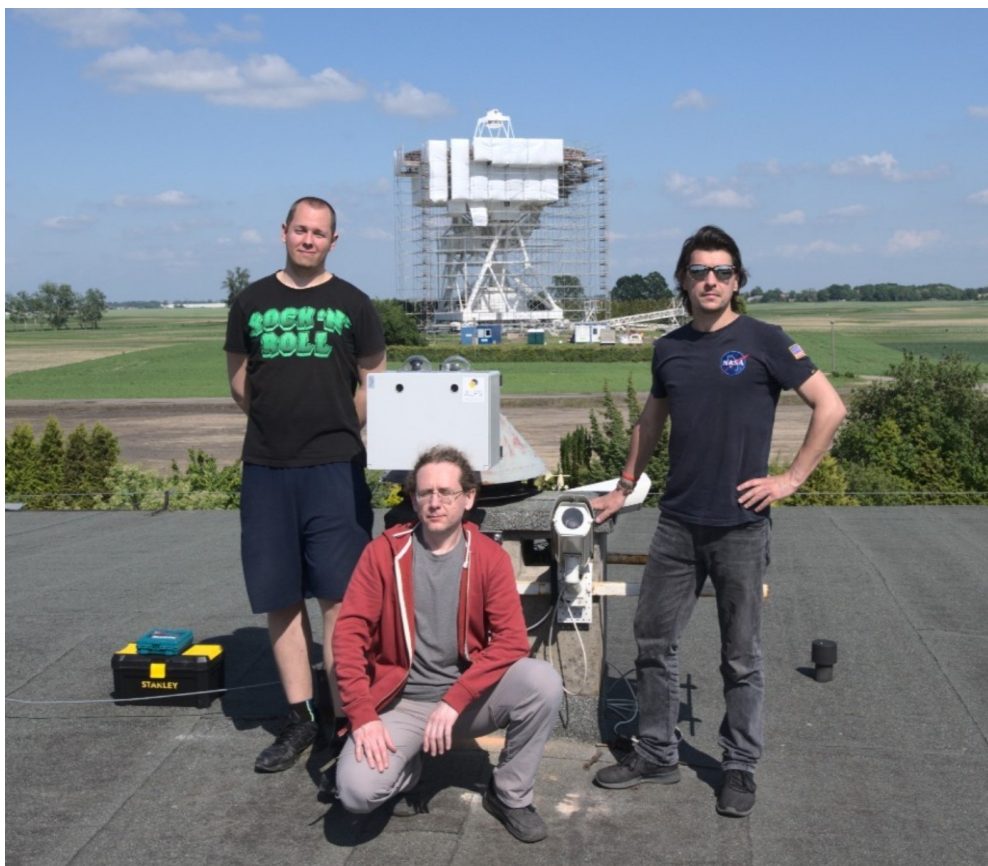


**Rys. 1.** Stacja ALPS–WRO w swojej pierwotnej formie.

Po lewej: fotometr SQM firmy Unihedron, po prawej: kamera SBIG Allsky 340

*Źródło: opracowanie własne.*

Kolejna stacja sieci ALPS została uruchomiona w czerwcu 2020 roku w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (rys. 2). Stacja zlokalizowana została na dachu radiowej części obserwatorium w podtoruńskiej wsi Piwnice. Bazując na poprzednich doświadczeniach, zespół skonstruował nową stację w oparciu o projekt stacji białkowskiej, tym razem wyposażając ją w lepszy i szybszy komputer sterujący oraz dwa niezależne zespoły czujników środowiskowych, a także w pełni sterowalny moduł grzejny. Pod koniec tego samego roku zespół zainstalował stację w miejscowości Sopotnia Wielka położonej w Beskidzie Żywieckim. Stacja powstała na zamówienie i dzięki finansowaniu Stowarzyszenia POLARIS – OPP. Tym razem stacja została wyposażona w kamerę ZWO o pięć razy większej rozdzielczości.



**Rys. 2.** Część zespołu ALPS po montażu stacji ALPS–PIW na dachu obserwatorium radiowego w Piwnicach, pod Toruniem. Od lewej: mgr Krzysztof Kotysz, dr Sylwester Kołomański, mgr Przemysław Mikołajczyk. W tle: 32–metrowy radioteleskop RT–4 Instytutu Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu  
*Źródło: opracowanie własne.*

Sopotnia Wielka objęta jest programem redukcji zanieczyszczenia światłem, a obserwacje pochodzące z takiej lokalizacji mogą okazać się niezwykle przydatne w ocenie skuteczności tego programu. Pierwsze obserwacje stacja ALPS–SOP przesłała w ostatnich dniach grudnia 2020 i w sposób ciągły przesyła je do dziś. Także w roku 2020, zmodernizowana została stacja ALPS–BIA, w której umieszczono moduł grzejny. Moduł taki znajduje się obecnie w każdej stacji ALPS. Ma on za zadanie zapewnić odpowiednie warunki wewnątrz stacji podczas chłodnych, zimowych dni i nocy (w założeniu do temperatury zewnętrznej nie mniejszej niż  $-15^{\circ}$  Celsjusza). W stacji ALPS–BIA wymieniono także czujniki środowiskowe tak, aby były identyczne z tymi zbierającymi dane w innych stacjach. Postępujący, w miarę zdobywania nowych doświadczeń, proces doskonalenia i ujednolicania wyposażenia, jak również oprogramowania stacji ALPS, jest jednym z ważnych elementów rozwoju projektu.

Na przełomie 2020 i 2021 roku wykonano modernizację stacji ALPS–WRO, której wyposażenie i sposób działania został zunifikowany z pozostałymi stacjami. W grudniu 2021 r. sieć rozszerzyła się o kolejną stację – ALPS–OST. Tym razem sprzęt pomiarowy został zainstalowany w obserwatorium astronomicznym Uniwersytetu Warszawskiego w Ostrowiku pod Warszawą. Pod koniec roku 2021 r. sieć ALPS liczyła pięć aktywnych stacji, w sposób ciągły przesyłających dane do serwera centralnego zlokalizowanego w Instytucie Astronomicznym UW we Wrocławiu.

Oprócz udoskonalania sprzętowego, projekt rozwijał się także w dwóch innych aspektach. Na przestrzeni ostatnich kilku lat zespół intensywnie pracował nad rozwojem oprogramowania sterującego stacjami oraz głównym serwerem. Oprócz wykorzystywania standardowych procedur udostępnianych między innymi przez producenta kamer umieszczanych wewnątrz stacji, członkowie zespołu stworzyli oprogramowanie sterujące ogrzewaniem, zbieraniem i magazynowaniem danych środowiskowych i naukowych.

Na przełomie 2019 i 2020 roku uruchomiona została nowa wersja strony internetowej projektu ALPS [13], znajdująca się na serwerze należącym do IA UW. Strona została zaprojektowana w nowoczesnej technologii Django opartej na języku programowania Python. Stworzono również możliwość łatwego zarządzania stacjami z dowolnego miejsca na Ziemi. Stacje z reguły pracują w sposób bezawaryjny. Jedyne sporadycznie zdarzają się niewielkie problemy z połączeniem z głównym serwerem, które zwykle wynikają z niskiej jakości łącza internetowego po stronie poszczególnych stacji. Doświadczenie pokazuje, że zainstalowanie nowego, szybkiego łącza rozwiązuje wszelkie problemy z dostępem do stacji i zarządzaniem ich zasobami. Ważną cechą stacji ALPS jest to, że nawet w przypadku całkowitego odcięcia ich od infrastruktury energetycznej i internetowej, wciąż zbierają dane, które po odzyskaniu łączności ze światem zewnętrznym przesyłane są do głównego serwera. Zapobiega to powstawaniu ubytków w ciągłości danych.

Główny serwer projektu zlokalizowany jest we Wrocławiu i jest nim komputer typu PC z odpowiednio dużym magazynem danych. Serwer odpowiada za sterowanie działaniem poszczególnych stacji, przechowuje i przetwarza dane oraz obsługuje

stronę internetową projektu. W styczniu 2022 roku zaktualizowana została specyfikacja sprzętowa serwera tak, aby z powodzeniem mógł zarządzać większą liczbą stacji pomiarowych.

### 2.3. Sieć stacji ALPS

Obecnie (marzec 2022 r.) sieć ALPS składa się z pięciu aktywnych, zunifikowanych stacji (tabela 1). Do sieci dołączona jest też kamera All-Sky i fotometr działające w należącym do Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie Obserwatorium Astronomicznym na Suhorze. Ten punkt pomiaru ZŚ jest również częścią sieci Pracowni Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego Politechniki Krakowskiej [14]. Instrumentami pomiarowymi są fotometr SQM i kamera SBIG All-Sky 340c. Jako że urządzenia te nie zostały połączone w jedną całość oraz nie są sterowane za pomocą oprogramowania stworzonego dla stacji ALPS, stąd stacja uznawana jest jedynie za częściowo aktywną w sieci ALPS. W tabeli 1 zestawiono stacje ALPS działające oraz planowane w niedalekiej przyszłości.

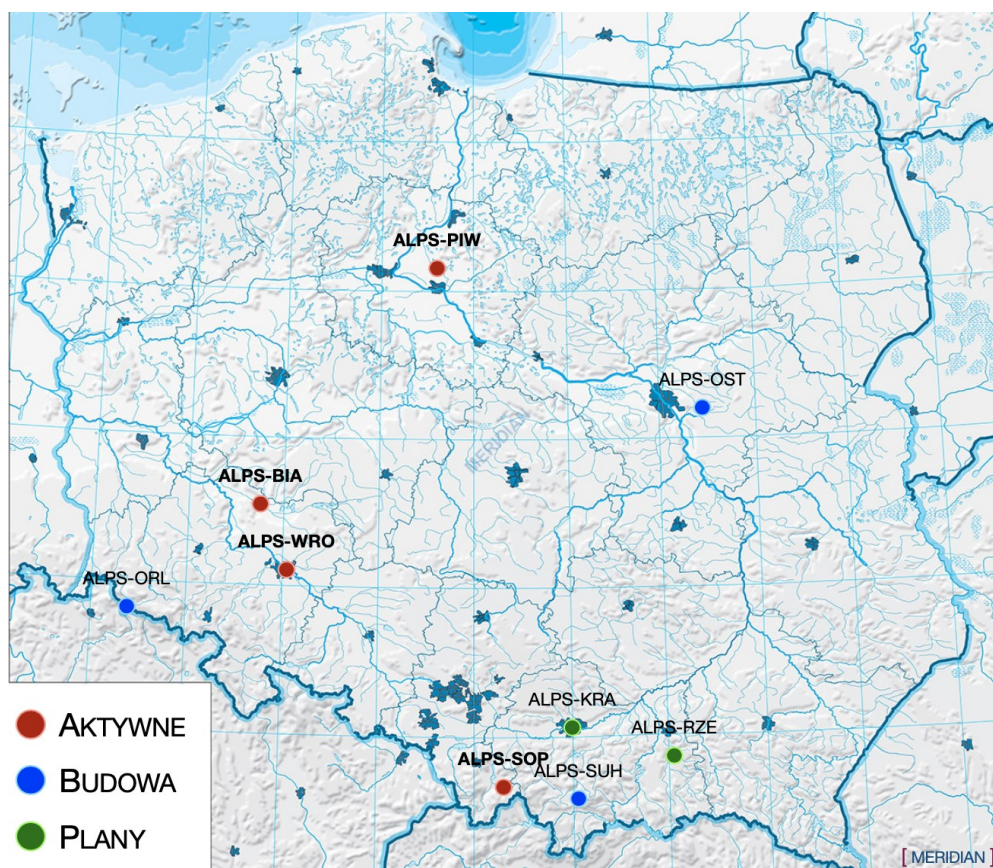
Tabela 1. Zestawienie stacji projektu ALPS

Nazwa stacji	Współrzędne geograficzne	Lokalizacja	Status
ALPS–WRO	51.10898 N, 17.0327 E	Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego, ul. M. Kopernika 11, Wrocław	aktywna
ALPS–BIA	51.47411 N, 16.6572 E	Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Wrocławskiego, Białków	aktywna
ALPS–PIW	53.08984 N, 18.5580 E	Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, Piwnice	aktywna
ALPS–SOP	49.59274 N, 19.2957 E	Obserwatorium Astronomiczne Zespołu Szkół Nr 4, POLARIS – OPP, Sopotnia Wielka	aktywna
ALPS–OST	52.08917 N, 21.4192 E	Stacja Obserwacyjna Uniwersytetu Warszawskiego, Ostrowi p. Warszawą	aktywna
ALPS–SUH	49.56942 N, 20.0673 E	Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie, Suhora	częściowo aktywna

Tabela 1. (cd.)

ALPS-ORL	50.81524 N, 15.3828 E	osiedle Orle, Izerski Park Ciemnego Nieba	w budowie
ALPS-KRA	50.06195 N, 19.9368 E	Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków	planowana
ALPS-RZE	49.79326 N, 21.0794 E	Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi, Rzepiennik Biskupi	planowana

Rysunek 3 przedstawia położenie stacji na mapie Polski.



Rys. 3. Mapa lokalizacji stacji projektu ALPS

Źródło: opracowanie własne, mapa w tle:

[www.pomoczeszkolne.edu.pl/media/products/8b306cd106e812e8e427ff0015b5481d/images/thumbnail/big\\_MR-GE-48-Polska-konturowa-hipsometryczna-1555x1155web.jpg](http://www.pomoczeszkolne.edu.pl/media/products/8b306cd106e812e8e427ff0015b5481d/images/thumbnail/big_MR-GE-48-Polska-konturowa-hipsometryczna-1555x1155web.jpg)

Stacje ALPS–WRO, ALPS–BIA oraz budowa stacji ALPS–ORL finansowane są ze środków Instytutu Astronomicznego UW. Pozostałe stacje powstały ze środków poszczególnych obserwatoriów. W dalszej perspektywie czasowej, istotnie zależnej do dostępnych środków finansowych, rozwój projektu będzie nakierowany na dołączanie do sieci ALPS kolejnych obserwatoriów astronomicznych. Zespół ALPS nawiązał również współpracę ze Słowińskim Parkiem Narodowym i Planetarium w Chorzowie, która ma na celu uruchomienie stacji w tych dwóch lokalizacjach. Szczególnie pierwsza lokalizacja, na północy Polski, może przynieść ciekawe obserwacje w postaci rejestracji obrazów zorzy polarnej. To zjawisko udało się już zaobserwować z pomocą kamer sieci ALPS. W zestawieniu z pomiarami satelitarnymi, obserwacje naziemne zórz polarnych stanowią cenny materiał naukowy do badania tego typu zjawisk, a w szerszym ujęciu do lepszego zrozumienia interakcji między magnetosferą a jonosferą [15].

## 2.4. Rodzaje i sposób zapisu gromadzonych danych

Stacje pomiarowe w sposób ciągły gromadzą kilka rodzajów danych:

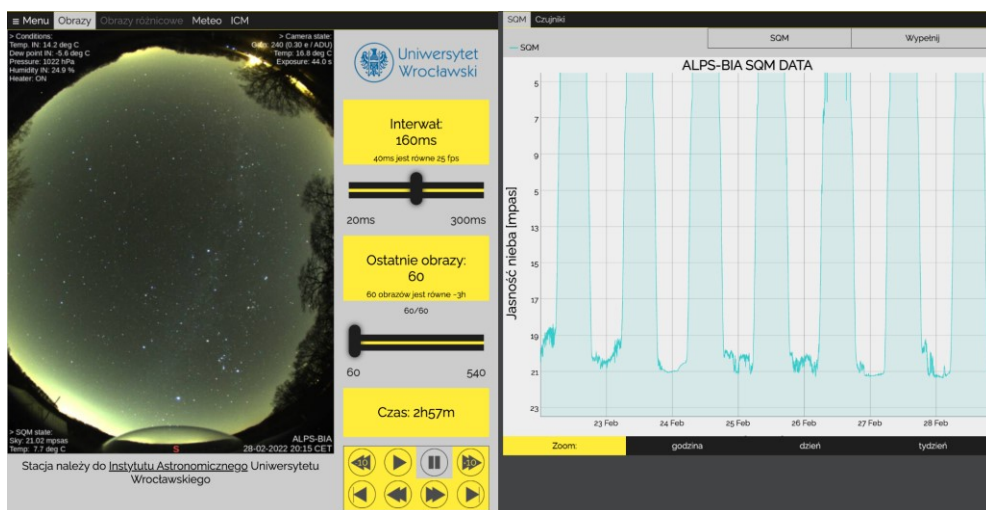
- a) Pomiary z fotometru SQM (*Sky Quality Meter*) – wykonywane w obszarze okołozenitalnym (~20 stopni rozwartości kątowej pola widzenia) z krokiem czasowym 1 minuty. Dane zapisywane są w formacie tekstowym oraz w nagłówkach plików z obrazami,
- b) Zdjęcia całego nieba – krok czasowy danych waha się w przedziale od 2 do 5 minut w zależności od przepustowości łącza internetowego w miejscu zainstalowania danej stacji,
- c) Dane z czujników środowiskowych – z krokiem czasowym 1 minuty gromadzone są informacje o temperaturze, wilgotności i ciśnieniu atmosferycznym wewnątrz i na zewnątrz stacji pomiarowej,
- d) Inne – informacje o stanie komputera sterującego stacją oraz przepustowości łącza internetowego.

Najważniejszą i kluczową dla osiągnięcia celów projektu formą gromadzonych danych, oprócz pomiarów fotometrycznych, są obrazy nieba w formacie FITS (ang. *Flexible Image Transfer System*). Obrazy te zawierają trzy warstwy, odpowiadające kolejno kolorom palety RGB: red – czerwony, green – zielony i blue – niebieski. W ten sposób pomiary prowadzone są w trzech niezależnych kanałach. Dzięki temu możliwa jest lepsza identyfikacja źródeł zanieczyszczenia światłem antropogenicznym – oświetlenie o wyższej temperaturze barwowej będzie generowało wyższy poziom zliczeń w niebieskiej części pasma i analogicznie – oświetlenie o niższej temperaturze – w części czerwonej. Dodatkowym plusem takiego sposobu wykonywania obrazów nieba jest generowanie kolorowych obrazów gwiazd. Dzięki zaawansowanemu oprogramowaniu stacji, napisanemu przez członków zespołu ALPS, kolory gwiazd na obrazie są zbliżone do rzeczywistych.

Wszystkie parametry ekspozycji, takie jak wzmocnienie sygnału (ang. *gain*), czas ekspozycji, balans kolorów w poszczególnych pasmach są ustawiane automatycznie. Pozwala to na uzyskiwanie dobrze naświetlonych obrazów nawet w warunkach szybko zmieniającej się jasności nieba (zmrzchy, świty). Oprócz samego obrazu nieba i informacji o parametrach ekspozycji, w pliku FITS gromadzone są wszystkie informacje o warunkach środowiskowych wewnątrz i na zewnątrz stacji, jasności nieba w momencie wykonywania ekspozycji oraz o temperaturze procesora komputera sterującego i jakości połączenia internetowego.

## 2.5. Przechowywanie i dostęp do danych

Uprawnieni użytkownicy (np. obserwatorzy z danego ośrodka astronomicznego) mają nieograniczony dostęp do danych gromadzonych z poszczególnych stacji. Poprzez szyfrowany interfejs SSH mogą oni pobierać surowe obrazy w formacie FITS, kolorowe obrazy w formacie PNG oraz dane z fotometru i czujników środowiskowych od początku ich akumulację przez daną stację. Dodatkowo specjalny interfejs internetowy pozwala na wygodne przeglądanie obrazów wykonanych podczas ostatnich 48 godzin oraz wyświetlanie wykresów jasności nieba i stanu stacji z ostatniego tygodnia. Przeglądanie najnowszych danych jest otwarte dla wszystkich użytkowników Internetu. Rysunek 4 przedstawia wygląd interfejsu internetowego.



**Rys. 4.** Interfejs internetowy stacji ALPS–BIA. Lewa strona interfejsu to przeglądarka obrazów z opcją odtwarzania animacji, dostęp do danych meteorologicznych zbieranych w miejscu instalacji stacji oraz do prognozy pogody dostarczanej przez serwis ICM Uniwersytetu Warszawskiego (<https://www.meteo.pl/>). Prawa strona interfejsu stanowi przeglądarkę danych o jasności nieba (z fotometru SQM) oraz danych środowiskowych stacji

*Źródło: opracowanie własne na podstawie [http://alps.astro.uni.wroc.pl/alps\\_bia/](http://alps.astro.uni.wroc.pl/alps_bia/).*



Podczas trwania projektu zgromadzono już ponad 7 TB danych w formie obrazów FITS i PNG. Ciągłe rozwijana infrastruktura sieci ALPS stawia przed zespołem projektu wyzwanie w postaci ciągłej konieczności powiększania magazynu danych dostępnego dla serwera. W związku z planowanymi nowymi lokalizacjami stacji ALPS zespół nawiązał współpracę z Wrocławskim Centrum Sieciowo-Superkomputerowym (WCSS) Politechniki Wrocławskiej. Dzięki uprzejmości WCSS uzyskano bezpłatny dostęp do 10 TB przestrzeni dyskowej, na której od marca 2022 r. dane ALPS składowane są w sposób zabezpieczony przed ich utratą.

Aby umożliwić użytkownikom korzystającym z zasobów projektu, łatwiejsze i bardziej wygodnie przeglądanie dużych ilości danych, tworzone są filmy poklatkowe (ang. *timelaps*), osobno dla każdego miesiąca. Można je znaleźć pod adresem internetowym kanału projektu ALPS [16] w serwisie YouTube.

### 3. Przyszłość projektu

W najbliższej przyszłości zespół projektu ALPS planuje następujące prace rozwojowe, związane głównie z wprowadzeniem nowych funkcjonalności w dostępie do danych:

- wyświetlanie obrazów różnicowych w aplikacji internetowej – obrazy różnicowe, czyli różnica dwóch następujących po sobie obrazów, pozwolą obserwatorom nocnego nieba na jeszcze lepszą ocenę warunków pogodowych (np. zmiana zachmurzenia);
- uruchomienie modułu wykrywania chmur na podstawie obserwacji wizualnych i pomiarów z fotometru SQM;
- implementacja modułu usuwania gorących pikseli z obrazów nocnego nieba, co poprawi ich jakość i walory wizualne;
- uruchomienie wsparcia dla dydaktyki astronomii, tj. włączenie możliwości wyświetlania gwiazdozbiorów bezpośrednio na obrazach, zaznaczanie i wyświetlanie nazw jasnych gwiazd i obiektów rozmytych nieba;
- dodanie tłumaczenia strony internetowej na kolejne języki;
- wyposażenie stacji ALPS–WRO w zewnętrzny moduł stacji pogodowej.

Ponadto, jak już wspomniano, sieć będzie rozbudowywana przez dodawanie kolejnych stacji pomiarowych. Wszystkie dane numeryczne zostaną przeniesione do bazy danych Influx, której zastosowanie pozwoli na stworzenie przystępnych i przyjaznych dla użytkownika wizualizacji. Ciągłe rozwijane jest oprogramowanie sterujące stacjami, a w fazie testów znajdują się dwie wersje aplikacji umożliwiające uprawnionym użytkownikom stacji sterowanie nimi w czasie rzeczywistym, w tym modyfikacja parametrów ekspozycji, sterowanie ogrzewaniem stacji oraz przesyłanie danych na dowolnie wybrany serwer zewnętrzny.

Dotychczas zgromadzone dane zostaną w najbliższym czasie przetworzone przez specjalne oprogramowanie, które pozwoli na uzyskanie informacji numerycznej o jasności nieba na podstawie obrazów. Dzięki takiej procedurze możliwe stanie się porównanie pomiarów wykonywanych za pomocą fotometru i kamer całego nieba oraz uzyskanie wielobarwnej fotometrii nieba. Dzięki dokładnej informacji o pogodzie, położeniu Słońca oraz położeniu i fazie Księżyca możliwa będzie bardziej zaawansowana analiza wpływu źródeł światła antropogenicznego na jasność powierzchniową nieba we wszystkich lokalizacjach. W dalszej perspektywie te dane mogą pomóc w przygotowaniu zaleceń technicznych, prowadzących do redukcji ZŚ i poprawienia warunków obserwacyjnych. W ten sposób sieć ALPS może stać się elementem wspierającym działania prowadzące do zachowania nocnego nieba jako ważnego zasobu naukowego i istotnego elementu krajobrazu.

Równolegle do uruchamiania dotychczasowych stacji, zespół ALPS pracował nad prototypami mniejszych wersji stacji pomiarowych. Pierwsza z nich miałaby być oparta jedynie o kamerę, a druga o obiektyw o mniejszej rozdzielczości. Pozwoli to na znaczące obniżenie kosztów budowy pojedynczej stacji i ewentualne poszerzenie bazy potencjalnych odbiorców zainteresowanych monitorowaniem poziomu ZŚ o np. placówki oświatowe na poziomie szkół ponadpodstawowych, ośrodki popularyzujące naukę i uczelnie wyższe. Zespół planuje także wystąpić o finansowanie rozwoju projektu ze środków krajowych.

## Podziękowanie

Obliczenia i archiwizację danych wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe.

## Literatura

- [1] Sánchez de Miguel A., Bennie J., Rosenfeld E., Dzurjak S., Gaston K.J., *First Estimation of Global Trends in Nocturnal Power Emissions Reveals Acceleration of Light Pollution*, *Remote Sensing*, 2021, 13, 3311.
- [2] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, *Science Advances*, 2016, 2, e1600377.
- [3] Hänel A., Posch T., Ribas S. J., et al., *Measuring night sky brightness: methods and challenges*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 205, s. 278–290.
- [4] Suomi National Polar-orbiting Partnership, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/NPP/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/main/index.html) (dostęp: 28.02.2022).
- [5] Sanders D., Frago E., Kehoe R., Patterson Ch., Gaston K.J., *A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night*, *Nature Ecology and Evolution*, 2021, 5, s. 74–81.

- [6] *Dark and Quiet Skies for Science and Society. Report and recommendations*, <https://www.iau.org/static/publications/dqskies-book-29-12-20.pdf> (dostęp: 1.03.2022).
- [7] Kohei Narisada K., Schreuder D., *Light pollution handbook*, Springer Dordrecht, 2004.
- [8] Nawalkowski P., Konior J., *Dark Sky Community Sopotnia Wielka – pierwsza społeczność czynnej ochrony ciemnego nieba w Polsce. Wnioski i waloryzacja działań 10 lat po modernizacji oświetlenia przestrzeni publicznej*, [w:] *Sztuczne światło nocą – między zagrożeniem a rozwojem*, P. Tabaka (red.), Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2022, s. 247-273.
- [9] Kołomański S., Niemczura E., Molenda-Żakowicz J., *The tenth anniversary of the Izera Dark-Sky Park*, [w:] *Ecological and astronomical aspects of light pollution*, T. Ściężor (red.), Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2021, s. 143–154.
- [10] Mrozek T., Kołomański S., *Izerski Park Ciemnego Nieba i inne inicjatywy*, *Prace i Studia Geograficzne*, 2014, 53, s. 171–185.
- [11] Witryna internetowa projektu Astro Izery, <http://www.astro.uni.wroc.pl/astroizery> (dostęp: 28.02.2022).
- [12] Witryna internetowa projektu Wygasz, <http://www.wygasz.edu.pl> (dostęp: 28.02.2022).
- [13] Witryna internetowa projektu ALPS, <http://alps.astro.uni.wroc.pl> (dostęp: 28.02.2022).
- [14] Pracownia Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego Politechniki Krakowskiej, <http://lightpollution.pk.edu.pl> (dostęp: 1.03.2022).
- [15] MacDonald E.A., Case N.A., Clayton J.H., Hall M.K., Heavner M., Lalone N., Patel K.G., Tapia A., *Aurorasaurus: A citizen science platform for viewing and reporting the aurora*, *Space Weather*, 2015, 13, s. 548–559.
- [16] Kanał projektu ALPS w serwisie YouTube, [https://youtube.com/channel/UCO00iYKMcDoJ\\_SYgMPW5ERA](https://youtube.com/channel/UCO00iYKMcDoJ_SYgMPW5ERA) (dostęp: 28.02.2022).

## DEVELOPMENT OF THE ALPS OBSERVING NETWORK

**Abstract:** We present the development, operation and goals of the ALPS project. The project focuses on monitoring the level of light pollution in Poland, in particular in astronomical observatories. For this purpose, numerical data are collected in the form of the surface brightness of the sky, measured near the zenith, and images of the entire sky are also made. Thanks to such measurements, it is possible to quantify the degree of degradation of the night sky by anthropogenic light. This light causes an increase in the brightness of the sky, and thus a decrease in the quality of observations, i.e. scientific research in the field of astronomy. Controlling and reducing light pollution is therefore a must from an astronomy point of view. The ALPS network of observation stations is an element that can support these efforts.

**Keywords:** light pollution, sky brightness, astronomical observations

# PLANOWANIE OŚWIETLENIA ZEWNĘTRZNEGO W GMINIE.

## ASPEKTY PRAWNOADMINISTRACYJNE<sup>7</sup>

Katarzyna Szlachetko<sup>8</sup>

Wydział Prawa i Administracji, Uniwersytet Gdański  
*katarzyna.szlachetko@prawo.ug.edu.pl*

**Streszczenie:** Rozdział przedstawia problematykę prawnych uwarunkowań planowania oświetlenia zewnętrznego w gminie w znaczeniu przestrzennym oraz inwestycyjnym. Rozważania uwzględniają zasady decentralizacji władzy publicznej oraz pomocniczości, które predysponują gminę jako jednostkę odpowiedzialną za planowanie oświetlenia zewnętrznego. W rozdziale przeanalizowano akty polityki przestrzennej gminy (studium, plan miejscowy, a także uchwałę krajobrazową) pod kątem możliwości regulacji norm planowania oświetlenia zewnętrznego oraz projekt założeń i plan zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe jako akty planowania inwestycyjnego

**Słowa kluczowe:** planowanie oświetlenia zewnętrznego, zrównoważona polityka oświetlenia zewnętrznego, oświetlenie zewnętrzne, ład przestrzenny, plan zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe.

## 1. Wstęp

Planowanie oświetlenia zewnętrznego jest elementem polityki publicznej, którą ze względu na przedmiot można określić mianem „polityki oświetlenia zewnętrznego”. Pojęcie „polityki” jest wieloznaczne, ale w perspektywie prawnoadministracyjnej należy je utożsamiać przede wszystkim z „działaniem w celu osiągnięcia konkretnych

---

<sup>7</sup> Rozdział jest efektem realizacji projektu Miniatura-5 „Prawne uwarunkowania zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego w mieście. Studium przypadku Kopenhagi” sfinansowanego ze środków z Narodowego Centrum Nauki, nr rej. 2021/05/X/HS5/01545.

<sup>8</sup> Radca prawny; Adiunkt w Katedrze Prawa Administracyjnego na Wydziale Prawa i Administracji Uniwersytetu Gdańskiego; Kierownik Programu Badawczego *Good Light Law* przy Instytucie Metropolitalnym; ORCID: 0000-0003-4667-3756.

zamierzeń” [1], czy „zespołem działań podjętych przez ośrodek decyzyjny, zmierzających do osiągnięcia zamierzonych celów za pomocą odpowiednio dobranych środków”, czyli z rozwiązywaniem skonkretyzowanych problemów [2]. Polityka publiczna jest szczególną postacią rodzajową polityki, prowadzoną przez organy władzy publicznej (rządowej i samorządowej). Za J. Hausnerem można przyjąć, że „polityki publiczne realizuje się w mniej lub bardziej wyodrębnionych obszarach życia społecznego przez zastosowanie specyficznych technologii, które nadają tym politykom techniczny charakter i pozornie odpolityczniają je” [3].

Polityka oświetlenia zewnętrznego to pojęcie pozaustawowe, ale jej wyodrębnienie jest uzasadnione potrzebą świadomej i celowej działalności organów władzy publicznej, która zmierza do racjonalnego i odpowiedzialnego:

- 1) planowania,
- 2) projektowania oraz instalowania,
- 3) użytkowania infrastruktury oświetlenia zewnętrznego.

*Ratio* kształtowania i prowadzenia polityki oświetlenia zewnętrznego jest wszechstronnie uzasadnione wymogami:

- ochrony życia i zdrowia ludzi,
- ochrony środowiska i przyrody,
- ochrony krajobrazu naturalnego i kulturowego,
- bezpieczeństwa,
- energooszczędności [4],

które „jak w soczewce” skupiają w sobie problematykę ograniczania szkodliwej emisji sztucznego światła (tj. przeciwdziałania zanieczyszczeniu sztucznym światłem).

Wymaga podkreślenia, że *de lege lata* w polskim prawodawstwie brakuje systemowych rozwiązań umożliwiających kształtowanie i prowadzenie polityki oświetlenia zewnętrznego w sposób kompleksowy i zrównoważony [4]. Celem publikacji jest rekonstrukcja prawnych podstaw kluczowego elementu polityki oświetlenia zewnętrznego, tj. planowania, które należy rozumieć jako wyznaczanie kierunków rozwoju oraz lokalizacji infrastruktury oświetlenia zewnętrznego, a także planowania inwestycji służących rozbudowie lub modernizacji tej infrastruktury. Planowanie oświetlenia zewnętrznego to kategoria zadania publicznego [5], które w prawie administracyjnym jest uznawane za zjurdyzowaną postać celu administracji publicznej [6], czyli „zaspokajania zbiorowych i indywidualnych potrzeb obywateli, wynikających ze współżycia ludzi w społecznościach” [7]. Ze względu na użytkowe oraz estetyczne funkcje oświetlenia zewnętrznego, jest to zadanie publiczne o doniosłym znaczeniu, które powinno być realizowane na poziomie organów władzy publicznej szczebla centralnego (przede wszystkim w zakresie ustalenia podstawowych założeń oraz zasad i kierunków) oraz szczebla terenowego, samorządowego (w zakresie wykonawczym).

Planowanie oświetlenia zewnętrznego wiąże się ściśle z planowaniem przestrzennym oraz planowaniem inwestycyjnym, dlatego na poziomie „operacyjnym” (wdrożeńowym) powinno być to zadanie własne samorządu gminnego. Takie założenie jest zgodne z zasadami decentralizacji władzy publicznej oraz pomocniczości, które stanowią podstawowe „wytyczne” podziału zadań i kompetencji pomiędzy państwo

a samorząd. Gmina jest podstawowym dysponentem przestrzeni publicznej, a zarazem jednostką samorządu terytorialnego odpowiedzialną za zaopatrzenie ludności w energię elektryczną [8], w ramach czego realizuje zadania związane m.in. z planowaniem oświetlenia zewnętrznego.

W rozdziale przedstawiono uwarunkowania prawne planowania oświetlenia zewnętrznego w gminie z uwzględnieniem zasad oraz narzędzi prawnych planowania (tj. aktów planistycznych). Analizie normatywnej poddano regulację ustawy z dnia 8 marca 1990 r. o samorządzie gminnym (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 1372 ze zm., dalej jako: u.s.g.) oraz dwóch ustaw materialnych: z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 741 ze zm., dalej jako: u.p.z.p.) oraz z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 716 ze zm., dalej jako: Pr. en.) wraz z aktami wykonawczymi. Ponadto w rozdziale sformułowano postulaty *de lege ferenda* dotyczące wzmocnienia narzędzi prawnych planowania oświetlenia zewnętrznego w gminie.

## 2. Prawne podstawy i zasady planowania oświetlenia zewnętrznego w gminie

Ustawodawca kwalifikuje w art. 7 u.s.g. do zadań własnych gminy (czyli tych, które służą zaspokajaniu zbiorowych potrzeb jej mieszkańców) m.in. sprawy ładu przestrzennego (pkt 1) oraz zaopatrzenia w energię elektryczną (pkt 3). Wymienione sprawy mogą dotyczyć również infrastruktury oświetlenia zewnętrznego, jednak przywołana regulacja prawna jest zbyt ogólna, żeby stanowić podstawę prawną do planowania oświetlenia zewnętrznego (określa bowiem wyłącznie zakres działania gminy). Kompetencja do wykonywania zadań publicznych musi wynikać ze szczególnej normy prawa materialnego, co uzasadnia sięgnięcie do regulacji ustaw odrębnych.

Pojęcie „ładu przestrzennego” zostało prawnie zdefiniowane w art. 2 pkt 1 u.p.z.p. jako: „takie ukształtowanie przestrzeni, które tworzy harmonijną całość oraz uwzględnia w uporządkowanych relacjach wszelkie uwarunkowania i wymagania funkcjonalne, społeczno-gospodarcze, środowiskowe, kulturowe oraz kompozycyjno-estetyczne”. Definicja legalna ładu przestrzennego ma ogólnikowy charakter, odwołuje się do zwrotów niedookreślonych, uwzględniając kontekst społeczny, gospodarczy, środowiskowy, kulturowy oraz estetyczny przestrzeni [9]. Brak wskazania skonkretyzowanych elementów ładu przestrzennego świadczy o szerokim rozumieniu tego pojęcia przez ustawodawcę i pozwala zakwalifikować do nich również urządzenia infrastruktury oświetlenia zewnętrznego.

Ład przestrzenny w przedstawionym znaczeniu stanowi, obok zrównoważonego rozwoju, nadrzędną zasadę kształtowania polityki przestrzennej, o czym wprost przesądza art. 1 u.p.z.p. Analizowana ustawa nie wprowadza „własnej” definicji zrównoważonego rozwoju, ale odwołuje się w art. 2 pkt 2 u.p.z.p. do znaczenia tego pojęcia w brzmieniu nadanym w art. 3 pkt 50 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. –

Prawo ochrony środowiska (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 1973 ze zm.). Zgodnie z przywołaną regulacją: „rozumie się przez to taki rozwój społeczno-gospodarczy, w którym następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych, z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych procesów przyrodniczych, w celu zagwarantowania możliwości zaspokajania podstawowych potrzeb poszczególnych społeczności lub obywateli zarówno współczesnego pokolenia, jak i przyszłych pokoleń”. Znamienne jest powiązanie przez prawodawcę zrównoważonego rozwoju z ochroną środowiska (zarówno w ustawie, jak i w art. 5 Konstytucji RP), co ma szczególne znaczenie w kontekście planowania oświetlenia zewnętrznego, które powinno służyć m.in. ograniczaniu zanieczyszczenia środowiska spowodowanego obecnością sztucznego światła w porze nocnej.

Art. 3 ust. 1 u.p.z.p. stanowi, że „Kształtowanie i prowadzenie polityki przestrzennej na terenie gminy, w tym uchwalanie studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy oraz miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego, z wyjątkiem morskich wód wewnętrznych, morza terytorialnego i wyłącznej strefy ekonomicznej oraz terenów zamkniętych, należy do zadań własnych gminy”. W nauce prawa administracyjnego utrwalił się pogląd, że przywołana regulacja wyposaża gminę w tzw. władztwo planistyczne, czyli prawnie gwarantowaną możliwość określania przez gminę warunków zagospodarowania przestrzeni [10]. Przez kształtowanie polityki przestrzennej należy rozumieć „analizowanie potrzeb w zakresie planowania i zagospodarowania przestrzennego i ustalanie kierunków tej polityki”, zaś przez jej prowadzenie „ustalanie miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego, a także analizowanie potrzeb zmiany studium i planu miejscowego” [11]. Jednocześnie władztwa planistycznego gminy nie można traktować w kategoriach autonomicznych. Gminie przysługuje bowiem „wyłącznie” samodzielność rozumiana jako wykonywanie zadań publicznych w imieniu własnym i na własną odpowiedzialność.

Samodzielność gminy, również w sprawach związanych z kształtowaniem i prowadzeniem polityki przestrzennej, musi być realizowana zgodnie z zasadą praworządności i podlega prawnie uregulowanemu nadzorowi. O zakresie władztwa planistycznego decyduje ustawodawca w drodze upoważnienia gminy do przyjmowania ustaleń i rozstrzygnięć w poszczególnych aktach planistycznych [12]. Konsekwencją naruszenia granic upoważnienia ustawowego lub nadużycia władztwa planistycznego powinno być stwierdzenie nieważności aktu planistycznego w całości lub w części [13]. Jak bowiem podkreśla Z. Czarnik: „Treść władztwa planistycznego gminy wyznaczają ustawy materialnego prawa publicznego i tylko one mogą być podstawą kreowania jakichkolwiek ograniczeń” [10]. Oznacza to, że kompetencje gminy do planowania oświetlenia zewnętrznego muszą wynikać z materialnoprawnej podstawy umożliwiającej przyjmowanie wiążących ustaleń w tym zakresie w aktach polityki przestrzennej. Przepisy u.p.z.p. nie przewidują jednak wprost regulacji „dedykowanej” planowaniu oświetlenia zewnętrznego, pomimo że rodzaj, natężenie oraz sposób lokalizowania urządzeń infrastruktury oświetlenia powinny być dostosowane do przeznaczenia lub funkcji terenu. Planując rozbudowę infrastruktury

należy również uwzględnić warunki zagospodarowania terenu, w tym istniejące oświetlenie zewnętrzne oraz charakter zabudowy (bądź jej brak).

Przepis art. 1 ust. 2 u.p.z.p. wymienia, że w planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym uwzględnia się, obok wymagań ładu przestrzennego (w tym urbanistyki i architektury) m.in.: walory architektoniczne i krajobrazowe (pkt 2), wymagania ochrony środowiska (pkt 3), wymagania ochrony dziedzictwa kulturowego i zabytków oraz dóbr kultury współczesnej (pkt 4), wymagania ochrony zdrowia oraz bezpieczeństwa ludzi i mienia (pkt 5), walory ekonomiczne przestrzeni (pkt 6), prawo własności (pkt 7), potrzeby obronności i bezpieczeństwa państwa (pkt 8), potrzeby interesu publicznego (pkt 9), a także potrzeby w zakresie rozwoju infrastruktury technicznej (pkt 10). Wymienione wymagania, potrzeby oraz wartości należy również uznać za determinanty planowania oświetlenia zewnętrznego, które:

- powinno służyć estetyzacji przestrzeni (szczególnie publicznej) oraz obiektów architektonicznych, zwłaszcza stanowiących dziedzictwo kulturowe, zabytki czy dobra kultury (poprzez ich odpowiednią iluminację);
- powinno ograniczać negatywne skutki zanieczyszczenia światłem, które ma destrukcyjny wpływ na zdrowie i życie człowieka, środowisko i krajobraz;
- powinno służyć zapewnieniu bezpieczeństwa w przestrzeniach publicznych po zapadnięciu zmroku, a zarazem spełniać wymogi energooszczędności w miejscach, w których aktywność ludzi zmniejsza się w porze wieczorowej i nocnej;
- powinno służyć zabezpieczeniu obiektów strategicznych z punktu widzenia obronności i bezpieczeństwa państwa;
- może służyć rozwojowi gospodarczemu miast.

W perspektywie aksjologicznej oraz prakseologicznej planowanie oświetlenia zewnętrznego „wpisuje się” w planowanie przestrzenne, jednak u.p.z.p. oraz akty wykonawcze do tej ustawy nie przewidują żadnych standardów dla oświetlenia zewnętrznego (zróżnicowanych ze względu na przeznaczenie bądź funkcje terenów) oraz nie określają wytycznych dotyczących projektowania urbanistycznego. W tym zakresie brakuje również szczegółowych wymogów w ustawach odrębnych, w szczególności takich, jak: ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 1973 ze zm.), ustawy z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 710) oraz ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 1098 ze zm.), które determinowałyby treść ustaleń gminnych aktów polityki przestrzennej.

„Przestrzenne” planowanie oświetlenia zewnętrznego należy odróżnić od planowania o charakterze inwestycyjnym związanym z realizacją obowiązku polegającego na zaopatrzeniu ludności w energię elektryczną, ciepło oraz paliwo gazowe. Na podstawie art. 18 ust. 1 pkt 2 Pr. en. do zadań własnych gminy w zakresie zaopatrzenia w energię elektryczną, ciepło i paliwa gazowe należą m.in.: planowanie oświetlenia znajdujących się na terenie gminy: miejsc publicznych, dróg gminnych, dróg powiatowych i dróg wojewódzkich, a także dróg krajowych, innych niż autostrady i dróg ekspresowych w rozumieniu ustawy z dnia 21 marca 1985 r. o drogach



publicznych (Dz.U. z 2020 r. poz. 470, 471, 1087 i 2338 oraz z 2021 r. poz. 54), przebiegających w granicach terenu zabudowy oraz części dróg krajowych, innych niż autostrady i drogi ekspresowe w rozumieniu ustawy z dnia 27 października 1994 r. o autostradach płatnych oraz o Krajowym Funduszu Drogowym (Dz. U. z 2020 r. poz. 2268), wymagających odrębnego oświetlenia przeznaczonych do ruchu pieszych lub rowerów oraz stanowiących dodatkowe jezdnie obsługujące ruch z terenów przyległych do pasa drogowego drogi krajowej. Zakres zadań własnych w zakresie zaopatrzenia w energię elektryczną obejmuje również finansowanie oświetlenia znajdujących się na terenie gminy (pkt 3): ulic, placów, dróg gminnych, dróg powiatowych i dróg wojewódzkich, a także dróg krajowych lub ich części we wskazanych wyżej przypadkach.

Przywołana regulacja Pr. en. przewiduje dość skonkretyzowany katalog obowiązkowych zadań własnych gminy i to nie tylko w zakresie planowania oświetlenia zewnętrznego, ale również jego finansowania. Zakres wykonywania tych zadań „bezpośrednio” przez samorząd gminny jest uzależniony od tego, czy na danym rynku lokalnym funkcjonuje przedsiębiorstwo energetyczne. Jak zauważa Ł. Rozmysłowski realizacja przez gminę tego zadania własnego ma „dwustopniowy” charakter: „Jeżeli na obszarze danej gminy funkcjonuje przedsiębiorstwo energetyczne i czyni to z powodzeniem, to obowiązki gminy, ale – co ważniejsze – jej kompetencje, sprowadzają się do czynności związanych z nadzorem i planowaniem dostaw ciepła, energii elektrycznej i paliwa gazowego” [14]. Kompetencje planistyczne gminy polegają wówczas zgodnie z art. 19 ust. 1 Pr. en. na opracowaniu projektu założeń do planu zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe. Dopiero, jeżeli plany przedsiębiorstw energetycznych nie zapewniają realizacji przyjętych przez organy gminy założeń, to w świetle art. 20 ust. 1 Pr. en.: „wójt (burmistrz, prezydent miasta) opracowuje projekt planu zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe, dla obszaru gminy lub jej części. Projekt planu opracowywany jest na podstawie uchwalonych przez radę tej gminy założeń i winien być z nim zgodny”.

### 3. Akty planowania oświetlenia zewnętrznego

Dotychczasowa analiza normatywna prowadzi do wniosku, że w obowiązującym prawie brakuje wiążących („twardych”) kompetencji organów gminy do kształtowania i prowadzenia polityki przestrzennej w zakresie planowania oświetlenia zewnętrznego. Wyraźnie są natomiast uregulowane kompetencje do „inwestycyjnego” planowania oświetlenia zewnętrznego, które służą realizacji zadań własnych gminy polegających na zaopatrzeniu ludności m.in. w energię elektryczną, w zakresie których mieści się planowanie oświetlenia zewnętrznego na terenie gminy. Wymaga jednak podkreślenia, że oprócz kompetencji do planowania oświetlenia zewnętrznego, potrzebne są również odpowiednie akty, które przewidują skonkretyzowane ustalenia dotyczące lokalizacji i rozwoju infrastruktury oświetlenia zewnętrznego.

Obligatoryjnym aktem polityki przestrzennej w gminie jest studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, które określa lokalne zasady gospodarowania przestrzennego. Zgodnie z art. 9 ust. 5 u.p.z.p.: „Studium nie jest aktem prawa miejscowego”, co oznacza, że nie może kształtować bezpośrednio sytuacji prawnej podmiotów spoza systemu administracji publicznej (mieszkańców, właścicieli nieruchomości, inwestorów itp.). Studium zawiera dwie kategorie ustaleń: uwarunkowania oraz kierunki. Pierwsze z nich dotyczą opisu „istniejącego stanu rzeczy”, zaś drugie stanowią „cele” rozwoju przestrzennego danej gminy. Art. 10 ust. 1 u.p.z.p. zawiera otwarty katalog uwarunkowań (o czym świadczy zwrot „w szczególności”), wśród których z perspektywy oświetlenia zewnętrznego szczególne znaczenie mają: dotychczasowe przeznaczenie, zagospodarowanie i uzbrojenie terenu (pkt 1), stan środowiska (pkt 3), stan dziedzictwa kulturowego i zabytków oraz dóbr kultury współczesnej (pkt 4), rekomendacje i wnioski zawarte w audycie krajobrazowym lub określenie przez audyt krajobrazowy granic krajobrazów priorytetowych (pkt 4a), warunki i jakość życia mieszkańców, w tym ochrona ich zdrowia, oraz zapewnienie dostępności osobom ze szczególnymi potrzebami, o których mowa w ustawie z dnia 19 lipca 2019 r. o zapewnianiu dostępności osobom ze szczególnymi potrzebami, zgodnie z uniwersalnym projektowaniem (pkt 5), zagrożenia bezpieczeństwa ludności i jej mienia (pkt 6); potrzeby i możliwości rozwoju gminy, uwzględniające w szczególności: analizy ekonomiczne, środowiskowe i społeczne (lit. a) oraz możliwości finansowania przez gminę wykonania infrastruktury technicznej służącej realizacji zadań własnych gminy (lit. c), występowanie obiektów i terenów chronionych na podstawie przepisów odrębnych (pkt 9) oraz stan systemów komunikacji i infrastruktury technicznej, w tym stopnia uporządkowania gospodarki energetycznej. Z kolei dla rozwoju infrastruktury oświetlenia zewnętrznego doniosłe znaczenie powinny mieć kierunkowe ustalenia studium, które określają: kierunki zmian w strukturze przestrzennej gminy oraz w przeznaczeniu terenów, w tym wynikające z audytu krajobrazowego oraz kierunki i wskaźniki dotyczące zagospodarowania oraz użytkowania terenów, w tym tereny przeznaczone pod zabudowę oraz tereny wyłączone spod zabudowy (pkt 1), obszary oraz zasady ochrony środowiska i jego zasobów, ochrony przyrody, krajobrazu, w tym krajobrazu kulturowego i uzdrowisk (pkt 3), obszary i zasady ochrony dziedzictwa kulturowego i zabytków oraz dóbr kultury współczesnej (pkt 4), kierunki rozwoju systemów komunikacji i infrastruktury technicznej, obszary, na których rozmieszczone będą inwestycje celu publicznego o znaczeniu lokalnym (pkt 6).

Studium jest sporządzane dla obszaru położonego w granicach administracyjnych gminy – każda gmina powinna sporządzić jeden taki akt polityki przestrzennej. Charakter prawny studium budzi wątpliwości, ponieważ pomimo jednoznacznego wyłączenia studium ze źródeł prawa powszechnie obowiązującego, ustawodawca w art. 9 ust. 4 u.p.z.p. zastrzega, że: „Ustalenia studium są wiążące dla organów gminy przy sporządzaniu planów miejscowych”. Plan miejscowy stanowi, zgodnie z art. 14 ust. 8 u.p.z.p., akt prawa miejscowego. Oznacza to, że ustalenia studium wpływają na treść norm planistycznych, które wraz z innymi przepisami kształtują sposób

wykonywania prawa własności (zob. art. 6 ust. 1 u.p.z.p.). W kontekście planowania oświetlenia zewnętrznego, istotne byłyby w szczególności ustalenia studium, które stosownie do § 5 pkt 5 rozporządzenia Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 17 grudnia 2021 r. w sprawie zakresu projektu studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy (Dz.U., poz. 2405) dotyczą kierunków rozwoju systemów komunikacji i infrastruktury technicznej i zawierają w szczególności wytyczne określania w planach miejscowych wykorzystania i rozwijania potencjału już istniejących systemów oraz koordynacji lokalnych i ponadlokalnych zamierzeń inwestycyjnych. Z przywołanych regulacji wynika, że ustalenia studium mogą determinować obszary rozmieszczenia infrastruktury technicznej oraz przyjmować zasady ochrony poszczególnych obszarów [15] – oczywiście pod warunkiem uprzedniego określenia przez ustawodawcę standardów dla oświetlenia zewnętrznego oraz przeciwdziałania zanieczyszczeniu światłem w odrębnych normach ustawowych. W tym zakresie istnieje luka normatywna, której „uzupełnienie” przez ustawodawcę powinno skłaniać do wykorzystania „potencjału” studium w planowaniu oświetlenia zewnętrznego. Przyjmując ustalenia w studium, gmina dokonuje bowiem swoistego „samozwiązania się” przy stanowieniu planów miejscowych.

Wiodącą rolę w kształtowaniu ładu przestrzennego odgrywają plany miejscowe [16], które obowiązują powszechnie w znaczeniu podmiotowym. Adresatami norm planistycznych są zarówno organy administracji publicznej, jak również podmioty spoza systemu administracji publicznej (właściciele nieruchomości, inwestorzy, mieszkańcy itp.). Z punktu widzenia planowania oświetlenia zewnętrznego istotne są obligatoryjne elementy planu przewidziane w art. 15 ust. 2 u.p.z.p., tj. określenie:

- przeznaczenia terenów oraz linii rozgraniczających tereny o różnym przeznaczeniu lub różnych zasadach zagospodarowania (pkt 1) – *de lege ferenda* oświetlenie zewnętrzne (rodzaj infrastruktury, standardy oświetleniowe) powinny być dostosowane do potrzeb użytkowników/mieszkańców danego terenu bądź wymogów jego ochrony;
- zasad ochrony i kształtowania ładu przestrzennego (pkt 2) – jak wskazano wyżej – urządzenia infrastruktury oświetlenia zewnętrznego mogą estetyzować bądź oszpecać przestrzeń;
- zasad ochrony środowiska, przyrody i krajobrazu (pkt 3) oraz zasad kształtowania krajobrazu (pkt 3a) – w kontekście przeciwdziałania zanieczyszczeniu sztucznym światłem;
- zasad ochrony dziedzictwa kulturowego i zabytków, w tym krajobrazów kulturowych, oraz dóbr kultury współczesnej (pkt 4) – chodzi o odpowiednie wykorzystywanie techniki świetlnej iluminacji dla eksponowania walorów architektury;
- wymagań wynikających z potrzeb kształtowania przestrzeni publicznych (pkt 5).

Ważnymi ustaleniami planistycznymi byłyby również zasady modernizacji, rozbudowy i budowy systemów komunikacji i infrastruktury technicznej (pkt 10), która służy zewnętrznemu oświetleniu.

W przedstawionym kontekście można jednak analizować wyłącznie „potencjał” planów miejscowych, albowiem żaden z przepisów powszechnie obowiązującego prawa nie upoważnia organów gminy do przyjmowania w planie miejscowym norm w odniesieniu do infrastruktury oświetlenia zewnętrznego. Bez wyraźnego upoważnienia ustawowego plan miejscowy nie może przewidywać nakazów, zakazów, dopuszczeń oraz ograniczeń dotyczących lokalizacji urządzeń oświetleniowych. Dodatkowym „mankamentem” planów miejscowych jest ich zasadnicza fakultatywność. Zgodnie bowiem z art. 14 ust. 7 u.p.z.p.: „Plan miejscowy sporządza się obowiązkowo, jeżeli wymagają tego przepisy odrębne”. Pomimo tego należy sceptycznie odnieść się do postulatu uregulowania odrębnych aktów planowania dla oświetlenia zewnętrznego i „mnożenia” kompetencji planistycznych gminy [17]. Pomiędzy planowaniem przestrzennym a planowaniem oświetlenia zewnętrznego zachodzą ściśle związki merytoryczne i funkcjonalne, dlatego zasadne jest ich kompleksowe uregulowanie w jednym akcie planistycznym.

Spośród aktów planistycznych uregulowanych w u.p.z.p. na odrębną uwagę zasługuje tzw. uchwała krajobrazowa, która stanowi fakultatywne narzędzie przeciwdziałania niekontrolowanej oraz agresywnej reklamie. Na podstawie art. 37a ust. w u.p.z.p.: „Rada gminy może ustalić w formie uchwały zasady i warunki sytuowania obiektów małej architektury, tablic reklamowych i urządzeń reklamowych oraz ogrodzeń, ich gabaryty, standardy jakościowe oraz rodzaje materiałów budowlanych, z jakich mogą być wykonane”. Uchwała może stanowić akt planowania oświetlenia zewnętrznego, ale w ograniczonym zakresie. Jej przedmiotem mogą być bowiem wyłącznie tablice reklamowe oraz urządzenia reklamowe, które emitują sztuczne światło (ewentualnie również obiekty małej architektury lub ogrodzenia, jeśli są podświetlane). Zakres przedmiotowy regulacji nie może obejmować wszystkich kategorii urządzeń oświetleniowych. Niemniej, w obowiązującym stanie prawnym jest to jedyny akt prawa powszechnie obowiązującego (ustawodawca przesądza w art. 37a ust. 4 u.p.z.p., że uchwała jest aktem prawa miejscowego), który może zawierać wiążące ustalenia planistyczne dotyczące niektórych źródeł oświetlenia zewnętrznego. Brakuje natomiast jakichkolwiek „wytycznych” dotyczących w szczególności określenia „standardów jakościowych”, co utrudnia gminom wykorzystanie uchwały krajobrazowej jako aktu planowania, chociażby niektórych urządzeń oświetleniowych.

Ustawodawca wprost przewiduje zasadę spójności aktów planowania oświetlenia zewnętrznego o charakterze inwestycyjnym z polityką przestrzenną gminy. Art. 18 ust. 2 pkt 1 Pr. en. stanowi, że gmina realizuje zadanie własne polegające na zaopatrzeniu w energię elektryczną, ciepło i gaz „zgodnie z miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego, a w przypadku braku takiego planu – z kierunkami rozwoju gminy zawartymi w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy”. Planowanie oświetlenia znajdujących się na terenie gminy miejsc publicznych oraz dróg może ograniczać się do sporządzenia przez radę gminy projektu założeń do planu zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe. Zgodnie z art. 19 ust. Pr. en. projekt założeń opracowuje wójt/burmistrz/prezydent miasta (ust. 1), uchwała zaś rada gminy (ust. 8). Sporządzenie projektu powinno uwzględniać dłuższą

perspektywę czasową, ponieważ zgodnie z art. 19 ust. 2 Pr. en.: „Projekt założeń sporządza się dla obszaru gminy co najmniej na okres 15 lat i aktualizuje co najmniej raz na 3 lata”. Z katalogu dość ogólnie sformułowanych obowiązkowych elementów projektu, dla planowania oświetlenia zewnętrznego doniosłe znaczenie ma wymóg określenia „możliwości stosowania środków poprawy efektywności energetycznej” (art. 19 ust. 3 pkt 3a Pr. en.). W obowiązującym stanie prawnym katalog tych środków został sformułowany w art. 6 ust. 2 ustawy z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (t.j. Dz.U. z 2021 r., poz. 2166 ze zm.). Ustawodawca kwalifikuje do środków poprawy m.in.: realizację i finansowanie przedsięwzięcia służącego poprawie efektywności energetycznej (pkt 1), nabycie urządzenia, instalacji lub pojazdu, charakteryzujących się niskim zużyciem energii oraz niskimi kosztami eksploatacji (pkt 2), wymianę eksploatowanego urządzenia, instalacji na urządzenie, instalację charakteryzujące się niskim zużyciem energii oraz niskimi kosztami eksploatacji lub ich modernizację (pkt 3). Co istotne, wśród przedsięwzięć służących poprawie efektywności energetycznej w art. 19 ust. 1 pkt 3 lit. a ustawy wymieniono wprost: „modernizację lub wymianę oświetlenia”.

Od projektu założeń należy odróżnić plan zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe, który zgodnie z art. 20 ust. 1 Pr. en. wójt (burmistrz, prezydent miasta) opracowuje, jeżeli plany przedsiębiorstw energetycznych działających na rynku lokalnym nie zapewniają realizacji przyjętych przez organy gminy założeń. Jednocześnie ustawodawca zastrzega *in fine*, że: „Projekt planu opracowywany jest na podstawie uchwalonych przez radę tej gminy założeń i winien być z nim zgodny”. Uchwalenie planu zaopatrzenia jest kompetencją rady gminy (art. 20 ust. 4 Pr. en.), przy czym jego ustalenia są bardziej szczegółowe od założeń projektu, ponieważ jak stanowi art. 20 ust. 2 Pr. en. zawierają m.in.: propozycje w zakresie rozwoju i modernizacji poszczególnych systemów zaopatrzenia wraz z uzasadnieniem ekonomicznym (pkt 1) i propozycje stosowania środków poprawy efektywności energetycznej (pkt 1b). Poza tym plan zaopatrzenia jest dokumentem operacyjnym, w którym powinien znaleźć się harmonogram realizacji zadań (pkt 2) oraz przewidywane koszty realizacji proponowanych przedsięwzięć wraz ze źródłem ich finansowania (pkt 3). Realizacja planu zaopatrzenia, który powinien uwzględniać planowanie oświetlenia zewnętrznego miejsc publicznych oraz dróg na terenie gminy jest wyzwaniem logistycznym i finansowym. Z tego względu ustawodawca wprost przewiduje możliwość współdziałania gminy w tym zakresie z podmiotami spoza jej struktury, tj. z przedsiębiorcami energetycznymi. Gmina może zawierać z nimi umowy, których celem jest realizacja planu, a gdyby realizacja planu na podstawie umów nie była możliwa, to rada gminy może na podstawie art. 20 ust. 6 Pr. en. wskazać w drodze uchwały tę część planu, z którą prowadzone na obszarze gminy działania muszą być zgodne.

Analiza aktów planowania przestrzennego oraz inwestycyjnego w kontekście planowania oświetlenia zewnętrznego prowadzi do wniosku, że ustawodawca reguluje instrumentarium niezbędne do realizacji tego zadania przez gminy. O ile jednak w odniesieniu do planowania oświetlenia w celu inwestycyjnym, podstawa

prawna jest wyraźna i literalnie nie budzi wątpliwości, to zdecydowanie brakuje szczegółowego upoważnienia do racjonalnego „przestrzennego” planowania infrastruktury oświetlenia w takich aktach jak studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego oraz plany miejscowe. Niezbędne jest wyraźne określenie zasad i standardów oświetlenia zewnętrznego, które mogłyby znaleźć odzwierciedlenie w treści ustaleń aktów polityki przestrzennej gminy.

#### 4. Podsumowanie

Planowanie oświetlenia zewnętrznego w gminie jest niezbędnym elementem zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego, która stanowi szczególną postać rodzajową polityki publicznej. Ustrojowe zasady decentralizacji władzy publicznej i pomocniczości, a także wyposażenie gminy we władztwo planistyczne predysponują tę jednostkę samorządu terytorialnego jako podstawowego wykonawcę zadań związanych z planowaniem oświetlenia zewnętrznego, które powinno uwzględniać dwa aspekty: planowanie rozumiane jako rozmieszczanie (określanie lokalizacji) infrastruktury oświetleniowej w przestrzeni wraz z dywersyfikacją standardów oświetlenia w zależności od funkcji i przeznaczenia terenu oraz planowanie inwestycyjne, które wiąże się z ustalaniem i realizacją przedsięwzięć inwestycyjnych związanych z rozwojem i modernizacją urządzeń infrastruktury oświetlenia zewnętrznego.

Pomimo że urządzenia oświetlenia zewnętrznego są elementami kształtującymi ład przestrzenny, to brakuje regulacji prawnych umożliwiających gminie ich „kontrolę” zgodnie z wymogami tego ładu oraz zasadą zrównoważonego rozwoju. Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego oraz miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego nie mogą w obecnym stanie prawnym stanowić skutecznych narzędzi planowania oświetlenia zewnętrznego ze względu na brak określenia zasad i wymogów w odrębnych regulacjach ustawowych, które są obligatoryjnie uwzględniane w gminnym planowaniu przestrzennym. *De lege ferenda* należy postulować wprowadzenie standardów planowania oświetlenia zewnętrznego zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju, która powinna determinować kierunki rozwoju infrastruktury oświetleniowej, uwzględniając potrzeby użytkowników przestrzeni publicznej oraz ochrony środowiska i krajobrazu.

#### Literatura

- [1] Słownik języka polskiego PWN, *Polityka*, <https://sjp.pwn.pl/sjp/polityka;2572025.html> (dostęp: 15.02.2021).
- [2] Chmaj M., *Przyczynek do wyjaśnienia pojęcia: polityka*, Annales Universitas Mariae Curie-Skłodowska Lublin – Polonia, 1995/1996, vol. II/III, s. 205.
- [3] Hauser J., *Polityka a polityka publiczna*, Zarządzanie Publiczne, 2007, 1, s. 51.
- [4] Szlachetko K. (red.), *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego*, Instytut Metropolitalny, 2022.

- [5] Stasikowski R., *O istocie funkcji planistycznej administracji publicznej*, Przegląd Prawa Publicznego, 2009, 5, s. 23–39.
- [6] Brzeski M., *Leksykon prawa administracyjnego. 100 podstawowych pojęć*, Warszawa, 2009, s. 524
- [7] Boć J. (red.), *Prawo administracyjne*, wyd. XI, Wrocław, 2005, s. 16.
- [8] Pelc W., *Planowanie energetyczne w gminie w świetle przepisów prawa energetycznego, w tym ostatnio wprowadzonych zmian*, Finanse komunalne, 2010, s. 39–43.
- [9] Woźniak M., *Ład przestrzenny jako paradygmat zrównoważonego gospodarowania przestrzenią*, Białostockie Studia Prawnicze, 2015, 18, s. 171.
- [10] Czarnik Z., *Istota i zakres władztwa planistycznego gminy*, Administracja: teoria, dydaktyka, praktyka, 2010, 3, s. 9.
- [11] Plucińska–Filipowicz A., T. Filipowicz [w:] *Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Komentarz aktualizowany*, red. M. Wierzbowski, A. Plucińska–Filipowicz LEX/el. 2021, art. 3.
- [12] Izdebski H. [w:] I. Zachariasz, H. Izdebski, *Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Komentarz*, Warszawa 2013, art. 3.
- [13] Jakimowicz W., *Władztwo planistyczne gminy – kompetencje, zadania, wolności*, Administracja: teoria, dydaktyka, praktyka, 2012, 1, s. 5–53.
- [14] Rozmysłowski Ł., *Granica zadania własnego gminy w zakresie zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe*, Samorząd terytorialny 2017, 10, s. 58.
- [15] Filipowicz T. [w:] *Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Komentarz aktualizowany*, red. A. Plucińska–Filipowicz, M. Wierzbowski, LEX/el. 2021, art. 9.
- [16] Małysa–Sulińska K., *Charakter normatywny aktów kształtujących ład przestrzenny*, Przegląd Prawa Publicznego, 2015, 9, s. 64.
- [17] Mantey D., *W labiryncie planowania*, Samorząd Terytorialny, 2012, 3, s. 18-27.

## THE PLANNING FOR OUTDOOR LIGHTING IN THE MUNICIPALITY. THE LEGAL AND ADMINISTRATIVE ASPECTS

**Abstract:** The chapter presents the problem of legal conditions for outdoor lighting planning in municipalities in the spatial and investment sense. The considerations take into account the principles of decentralization of public authority and subsidiarity, which predispose the municipality as the entity responsible for the planning of outdoor lighting. The chapter analyzes the municipality’s spatial policy acts (study, local plan and landscape resolution) from the perspective of the possibility of regulating the outdoor lighting planning standards and the draft assumptions and the plan for supplying heat, electrical energy and gas fuels as acts of investment planning

**Keywords:** outdoor lighting planning, sustainable outdoor lighting policy, outdoor lighting, spatial order, heat, electricity and gas supply plan

# DARK SKY COMMUNITY SOPOTNIA WIELKA – PIERWSZA SPOŁECZNOŚĆ CZYNNEJ OCHRONY CIEMNEGO NIEBA W POLSCE

## WNIOSKI I WALORYZACJA DZIAŁAŃ 10 LAT PO MODERNIZACJI OŚWIETLENIA PRZESTRZENI PUBLICZNEJ

Piotr Nawalkowski

Jakub Konior

Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo – Polska  
*ciemnieniebo@op.pl*

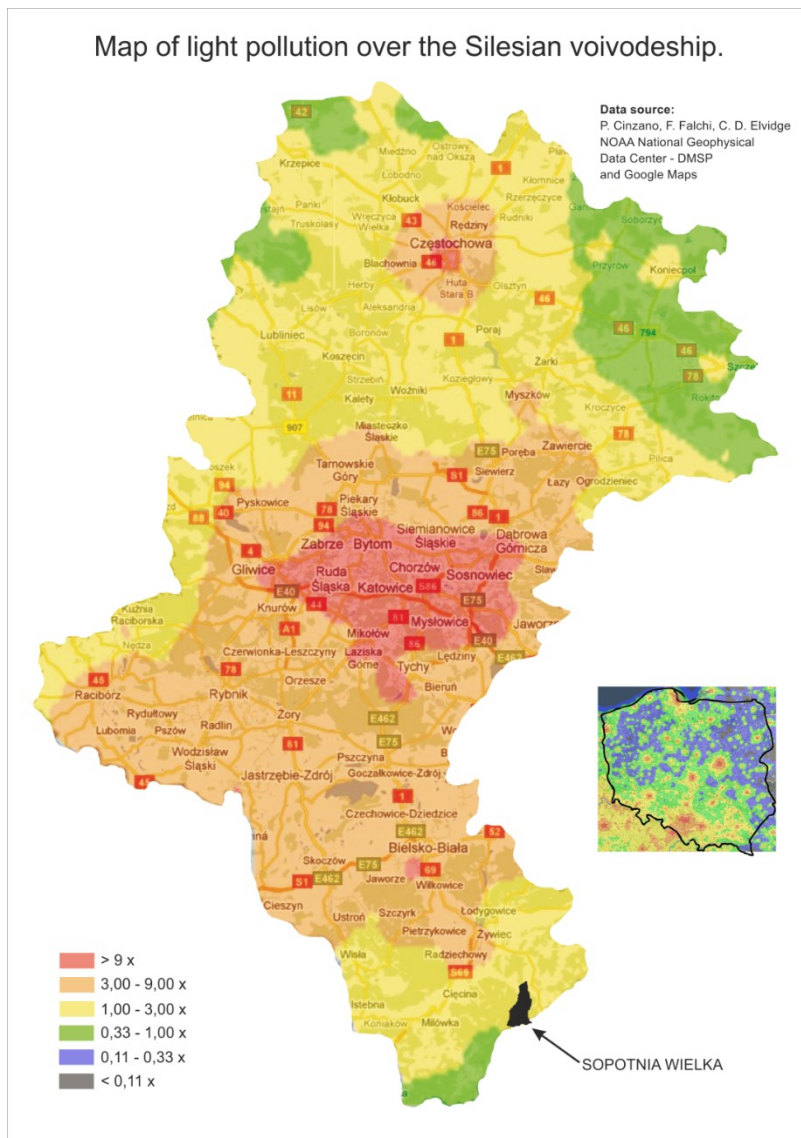
**Streszczenie:** W 2021 roku minęło 10 lat od przeprowadzonej inwestycji w postaci modernizacji oświetlenia ulicznego pod obszar ochrony ciemnego nieba w Sopotni Wielkiej. Mimo upływu lat jest to nadal jedyna miejscowość w Polsce, gdzie świadomie dokonano kompleksowych zmian w infrastrukturze oświetleniowej, redukując zanieczyszczenie światłem. W opracowaniu poruszono waloryzację podjętych działań na przestrzeni ww. lat z udziałem wybranych projektów dotacyjnych, realizowanych przez Stowarzyszenie POLARIS – OPP. Autorzy przedstawiają podjęte czynności w korelacji z wytycznymi, jakie musi spełnić społeczność ubiegająca się o tytuł IDSC do International Dark-Sky Association w USA. Zagadnienie wykracza jednak poza opracowaną w 2021 roku aplikację o ww. tytuł, powstałą w ramach projektu przy wsparciu programu ESC Komisji Europejskiej. Wnioski dotyczą korzyści płynących z podjętych działań, a także tego, z jakimi przeciwnościami muszą się mierzyć społeczności lokalne, zainteresowane czynną ochroną ciemnego nieba.

**Słowa kluczowe:** ciemne niebo, Sopotnia Wielka, Dark Sky Community, IDA, POLARIS – OPP



# 1. Wstęp

Sopotnia Wielka jest miejscowością położoną na południu powiatu żywieckiego w woj. śląskim (rys. 1), na terenie której w 2011 roku powstał pierwszy w Polsce obszar czynnej ochrony ciemnego nieba.



Rys. 1. Położenie Sopotni Wielkiej na mapie województwa śląskiego wraz z zaznaczeniem poziomów zanieczyszczenia światłem – stan na 2012 rok

Źródło: P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge NOAA National Geophysical Data Center – DMSP oraz Mapy Google.

Zainicjowane na przestrzeni lat działania doprowadziły, m.in. do znacznego zwiększenia świadomości społecznej w zakresie zanieczyszczenia sztucznym światłem i w efekcie do wymiany całego oświetlenia publicznego na terenie miejscowości. To co przyczyniło się do redukcji emisji zbędnego światła, tj. oprawy oświetleniowe z płaskim kloszem ( $ULR = 0\%$ ), skierowane tylko w dół oraz wyposażone w źródło o ciepłej barwie światła (najbliższej niskiej temperaturze barwowej).

Na bazie tych osiągnięć sukcesywnie wdrażano kolejne projekty i działania edukacyjne. Przyspieszający rozwój miejscowości, w tym napływ nowych mieszkańców oraz powstawanie kolejnych budynków, spowodował potrzebę dalszego wsparcia oddolnej inicjatywy lokalnej na rzecz ochrony ciemnego nieba, na co w 2020 roku odpowiedzią miał być projekt „Dark Sky Community”, finansowany w ramach Europejskiego Korpusu Solidarności. W jego ramach opracowano aplikację o tytuł Międzynarodowej Społeczności Ciemnego Nieba (ang. *International Dark-Sky Community – IDSC*) [1] dla Sopotni Wielkiej i zintensyfikowano starania o uzyskanie tego odznaczenia, nadawanego przez International Dark-Sky Association (IDA), jako pierwszego w tej części Europy.

Należy jednak podkreślić, że przedstawione powyżej zagadnienie IDSC i wymogi, jakie muszą spełnić miejscowości w celu jego uzyskania, nie były pierwotnym celem podjętych działań na terenie Gminy Jeleśnia w 2011 roku. Ideą było utworzenie na terenie Sopotni Wielkiej pierwszego w kraju obszaru czynnej ochrony ciemnego nieba, poprzez którą należy rozumieć zestaw wytycznych, wypracowanych przez koordynatorów i działaczy społecznych Programu Ciemne Niebo Polska, metodą otwartych konsultacji oraz negocjacji społecznych z mieszkańcami i mieszkankami terenu sołectwa od marca 2009 do listopada 2010 roku. Uzgodnienia te prowadzono we współpracy z Wydziałem Inwestycji, Oświetlenia Dróg i innych jednostek urzędu Gminy Jeleśnia, a także z zakładem energetycznym zarządzającym infrastrukturą oświetleniową na terenie ww. miejscowości.

U podstaw opracowanych wytycznych leżały m.in. następujące cele, zaczerpnięte z założeń Programu Ciemne Niebo w 2005 roku i jednocześnie zbieżne z działaniami zapisanymi w Lokalnej Strategii Rozwoju (LSR) na lata 2007–2013 Stowarzyszenia LGD Żywiecki Raj, obejmującego Gminę Jeleśnia [2]:

- określenie odpowiednich wzorów opraw i urządzeń oświetleniowych dostępnych na polskim rynku, chroniących przed zbędną ucieczką sztucznego światła w niebo,
- nawiązywanie porozumień z lokalnymi władzami i zarządcami oświetlenia w kwestii redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem,
- wymiana nieprawidłowych opraw oświetleniowych na chroniące nocne niebo przed emisją sztucznego światła w miejscach, gdzie np. prowadzi się systematyczne obserwacje astronomiczne, ze względu na walory krajobrazowe, szczególne znaczenie przyrodnicze, astroturystyczne itp.

Co ważne, LSR również była opracowana z zastosowaniem metody inicjatywy oddolnej, na podstawie pogłębionej analizy SWOT (ang. *Strengths* – silne strony, *Weaknesses* – słabe strony, *Opportunities* – szanse, okazje i *Threats* – zagrożenia) oraz

w oparciu o współpracę trójsektorową, czyli samorządu (JST), organizacji społecznych (NGO) i biznesu (MSP), jako przygotowanie do działań wdrożeniowych Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich (PROW) na lata 2007–2013. Uwzględnienie wypracowanych wytycznych w strategii było możliwe za sprawą obecności przedstawicieli Stowarzyszenia POLARIS – OPP, czyli organizacji wchodzącej w skład LGD, jako jednego z członków–założycieli ówczesnego związku stowarzyszeń na tym terenie. Już wtedy działania na rzecz zrównoważonego rozwoju były wpisane w cele prowadzenia polityki ekologicznej przez UE, jednak warto podkreślić, że wówczas nie istniały jeszcze konkretne normy i przepisy prawne dotyczące zanieczyszczenia światłem [3].

W wyniku tych ustaleń opracowano specyfikację istotnych warunków zamówienia (SIWZ) do postępowania przetargowego, uwzględniając redukcję zjawiska określanego na świecie jako *light pollution* [4], zaś na potrzeby realizacji projektu w Polsce, funkcjonującego pod pojęciem „ochrony ciemnego nieba” [5] lub zanieczyszczenia światłem [6]. SIWZ zawierała informację, iż przedmiot zamówienia należy wykonać przestrzegając Polskich Norm lub klasyfikacji wydanych na podstawie Ustawy z dnia 29 czerwca 1995 roku o statystyce publicznej (Dz.U. nr 88, poz. 439 i Dz.U. nr 156, poz. 775 z 1996 roku) oraz zgodności z Prawem budowlanym, które określa konkretne wymogi, jakie spełniać muszą wyroby przy realizacji robót budowlanych [7].

Jednak w punkcie 2. MATERIAŁY wyszczególniono dodatkowo podpunkt „2.1. Ogólne wymagania dotyczące materiałów”, określające konieczną zgodność z ochroną ciemnego nieba, co było ewenementem dla realizowanych wówczas robót montażowych wymiany ulicznych opraw oświetleniowych, zainstalowanych na słupach energetycznych linii niskiego napięcia, będących własnością ENION GRUPA TAURON S.A. Większość tych warunków dodatkowych pochodziła lub była opracowana w oparciu o podstawowe założenia przedstawione w książce *Light Pollution Handbook* pod red. Kohei N. i Schreuder D., ale zaimplementowane do polskich realiów i możliwości, które były do zaakceptowania zarówno przez inwestora, zakład energetyczny, jak i wykonawcę. Zapisy te brzmiały następująco:

- a. uliczna oprawa oświetleniowa II klasy ochronności o maksymalnej mocy źródła światła 70 W,
- b. źródło światła – wysokoprężna lampa sodowa o mocy 70 W,
- c. płaska szyba ze szkła hartowanego zamontowana nad powierzchnią oświetlaną poziomo, tak aby jej płaszczyzna była prostopadła do osi pionu ( $90^\circ$ ),
- d. oprawa zapewniająca całkowite odcięcie światła w górnej półprzestrzeni (ULOR – 0,0%) potwierdzona przez producenta oprawy. Płaszczyzna szyby hartowanej musi być równoległa do płaszczyzny korpusu oprawy,
- e. możliwość regulacji kąta nachylenia oprawy w płaszczyźnie pionowej minimum od  $0^\circ$  do  $15^\circ$ ,
- f. możliwość regulacji kąta nachylenia odbłyśnika minimum  $3^\circ$ ,
- g. oprawa oświetleniowa winna być wyposażona w zapłonnik elektroniczny ograniczający zużycie energii i system ściemniania z wyłącznikiem czasowym

- nie wymagający przewodu sterującego. Zakres redukcji mocy oraz strumienia świetlnego wybrany wykonawca uzgodni z zamawiającym po przetargu,
- h. możliwość montażu na wysięgniku rurowym o średnicy od 42 mm do 60 mm,
  - i. stopień ochrony: IP66.

Wytyczne te zostały przyjęte w głosowaniu otwartym w dniu 4 marca 2011 roku przez radę sołecką w Sopotni Wielkiej, a także jako element strategii planu odnowy wsi, uwzględniający rozwój astroturystyki na terenie sołectwa dla zapewnienia odpowiednich warunków funkcjonowania pod projektowane w następnych latach obserwatorium astronomiczne. Inicjatorem także i tego przedsięwzięcia było Stowarzyszenie POLARIS – OPP, które następnie zawiązało porozumienie nr 2/CN–001 z dn. 4 stycznia 2012 roku z Gminą Jeleśnia, uwzględniające, między innymi, oprócz minimalizacji ucieczki światła w górną półprzestrzeń z zainstalowanych opraw oświetleniowych, także wspólną budowę kompleksu edukacyjno-społecznego przy miejscowej szkole. Wszystkie te czynności doprowadziły do pełnej modernizacji publicznej infrastruktury oświetlenia zewnętrznego na terenie ww. sołectwa, w liczbie końcowej ponad 180 ulicznych opraw, kilku punktów oświetlenia parkingu przy cmentarzu, a nawet redukcję niepożądanego światła poza obrys miejscowego gmachu kościoła pw. NMP Nieustającej Pomocy. Już wtedy brano także pod uwagę założenia, zgodne z celami MDG (ang. *Millennium Development Goals*) [8], a w szczególności pkt. 7 tego dokumentu ONZ, mówiącego o zasadach zrównoważonego rozwoju oraz zahamowania utraty zasobów środowiska naturalnego.

Nawet dzisiaj mając już na względzie cele SDG (ang. *Sustainable Development Goals*) [9], inwestycja koreluje w szczególności z celem nr 11, mówiącym o uczynieniu miast i osiedli ludzkich bezpiecznymi, stabilnymi, zrównoważonymi, oraz sprzyjającymi włączeniu społecznemu. Stało się tak, gdyż od początku brano pod uwagę objęcie projektem obszarów miejscowości, w których brakowało punktów oświetlenia ulicznego, a niewątpliwie były one konieczne z poziomu interesu mieszkańców. Istotnym było więc nie tylko zminimalizowanie zjawiska emisji światła w niepożądane kierunki, ale i zapewnienie oświetlenia tam, gdzie go faktycznie brakowało dla zapewnienia bezpiecznej w użytkowaniu przestrzeni publicznej. Ten argument zaś był zgodny z celami PROW 2007–2013, mówiącym o poprawie jakości życia mieszkańców na terenach wiejskich [10]. Widok nocnej panoramy miejscowości Sopotnia Wielka, uzyskany w wyniku dokonanej modernizacji zamieszczono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Panorama nocna miejscowości Sopotnia Wielka – widok z przysiółka Grygusie po wykonanej modernizacji oświetlenia ulicznego w 2011 roku

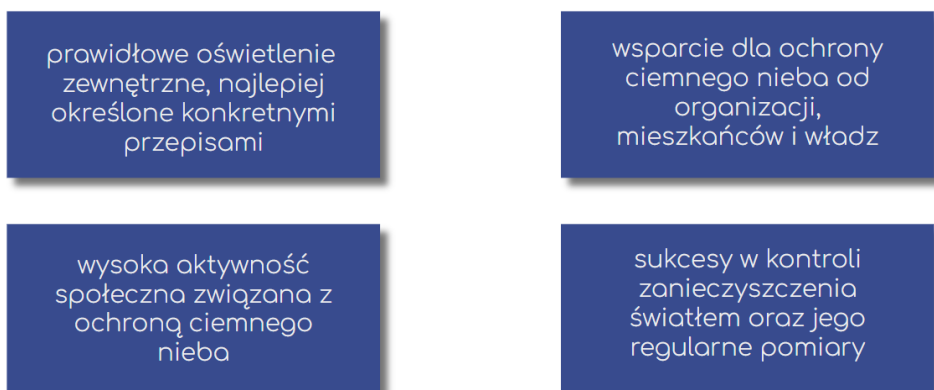
*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo Polska.*

## 2. Projekt „Dark Sky Community”

Projekt został utworzony przez grupę inicjatywną młodzieży we współpracy ze Stowarzyszeniem POLARIS – OPP w celu m.in. zwiększenia świadomości mieszkańców na temat ochrony ciemnego nieba oraz nakłonienia ich do redukcji zanieczyszczenia świetlnego na ich własnych posesjach. Uzyskanie tytułu IDSC wiąże się bowiem z koniecznością spełnienia licznych wymagań [1]. Może go otrzymać miasto, wieś, gmina lub inna jednostka terytorialna, która udowodniła wyjątkowe starania na rzecz ochrony ciemnego nieba przed zanieczyszczeniem sztucznym światłem. Cele, które przyświecają powstawaniu międzynarodowych społeczności ciemnego nieba są następujące:

- identyfikacja społeczności wyjątkowo angażujących się w ochronę ciemnego nieba,
- wsparcie ochrony ludzkiego zdrowia, środowiska naturalnego oraz publicznego zainteresowania nocnym niebem i jego dziedzictwem,
- wyróżnienie danej społeczności na szczeblu lokalnym, krajowym i międzynarodowym,
- utrzymanie warunków idealnych dla działań astronomów amatorskich i zawodowych.

Wymagania regulujące uzyskanie tego tytułu można w uproszczeniu na cztery najważniejsze kategorie, które zamieszczono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Główne wymagania warunkujące uzyskanie tytułu IDSC

*Źródło: opracowanie własne na podstawie IDSC Guidelines [1].*

Każda Międzynarodowa Społeczność Ciemnego Nieba musi przede wszystkim być obszarem czynnej ochrony ciemnego nieba, a zatem powinna posiadać na swoim terenie jak najmniejsze zanieczyszczenie sztucznym światłem. Realizuje się to poprzez stosowanie się do dobrych praktyk przy wyborze i instalacji oświetlenia zewnętrznego. Główne założenia oraz minimalne wymagania prawidłowego oświetlenia pod kątem ochrony ciemnego nieba według IDA to [1]:

- brak emisji strumienia świetlnego w górną półprzestrzeń w przypadku opraw oświetleniowych, których całkowity strumień świetlny przekracza 1000 lm,
- ograniczenie światła krótkofalowego za pomocą jednej z proponowanych metod (np. stosowanie źródeł światła/opraw oświetleniowych o temperaturze barwowej najbliższej nieprzekraczającej 3000 K),
- określenie dozwolonej ilości światła emitowanego w górną półprzestrzeń oraz zasad regulujących problem przewymiarowania strumienia świetlnego,
- stworzenie regulacji i wymogów dla potencjalnego nowego oświetlenia publicznego,
- limity dotyczące instalacji i oświetlenia tablic reklamowych oraz znaków,
- ograniczenia dla oświetlania obiektów rekreacyjnych i sportowych.

Powyższe punkty powinny być realizowane w miarę możliwości przy pomocy specjalnych przepisów, które obowiązywałyby przede wszystkim oświetlenie publiczne oraz, jeśli przepisy danego kraju na to pozwalają, również oświetlenie prywatne. Jednak IDA w przypadku rozpatrywania aplikacji o nadanie swoich tytułów, dopuszczała już wyjątki od tej reguły, czego przykładem jest kilka chronionych miejsc ciemnego nieba w Wielkiej Brytanii, gdzie nie było możliwości wprowadzenia nakazu stosowania określonych opraw oświetlenia zewnętrznego na posesjach prywatnych [11].

Przyjrzymy się zatem czterem zasadom podstawowym, przedstawionym na rysunku 3. W Sopotni Wielkiej całe oświetlenie publiczne spełnia wymagania nałożone przez IDA i jest to uregulowane m.in. poprzez porozumienia z władzami Gminy

Jeleśnia (patrz: punkt 3). W celu ustandaryzowania wytycznych dla oświetlenia w tej miejscowości utworzono (wraz z liczną grupą ekspertów, aktywistów oraz mieszkańców i przedstawicieli samorządowych) dokument pod nazwą Racjonalna Polityka Oświetleniowa [12]. Z uwagi na brak przepisów w polskim prawie, regulujących problem zanieczyszczenia światłem [13, 14], powyższa Polityka nie jest jednak źródłem powszechnie obowiązującego prawa, a zestawem zaleceń i dobrych praktyk, których stosowanie ma na celu zredukowanie zanieczyszczenia świetlnego na terenie tej miejscowości, co w rezultacie ma poprawić jakość nocnego nieba oraz mieć pozytywny wpływ na lokalny ekosystem.

Przepisy krajowe nie pozwalają aktualnie na stworzenie lokalnego aktu prawnego, który nakładałby obowiązek stosowania się do poruszanych w punkcie 1. zasad w przypadku prywatnego oświetlenia zewnętrznego. Potwierdzają to także interpretacje prawne oraz interpelacje poselskie, wśród których znajduje się odpowiedź Ministra Klimatu, gdzie jasno wskazano, iż w polskim prawodawstwie w zakresie ochrony środowiska brak jest norm dotyczących emisji światła [15].

Działania prowadzone na terenie Gminy Jeleśnia skupiały się zatem na zachęcaniu mieszkank i mieszkańców oraz władz samorządowych do współdziałania w inicjatywie ochrony ciemnego nieba i stosowaniu prawidłowego oświetlenia. Analizując efekty społeczne, ewaluowane m.in. poprzez obserwację i ankietyzację (patrz punkt 3), tego typu działania okazały się skuteczne bez konieczności stosowania „przymusu”, jednak wymagało to pracy u podstaw metodą partycypacji obywatelskiej oraz było czasochłonne. Mimo to, warunek stosowania oświetlenia zgodnego z ochroną ciemnego nieba został w Sopotni Wielkiej spełniony, ponieważ istniejące już teraz oświetlenie zewnętrzne (zarówno publiczne, jak i prywatne) jest zgodne z zasadami Racjonalnej Polityki Oświetleniowej. Można więc uznać, iż spełniony zostaje kolejny z głównych warunków wyszczególnionych na rysunku 3, czyli wysoka aktywność społeczna związana z ochroną ciemnego nieba.

Osoby zamieszkujące miejscowość w dużym stopniu wyrażają poparcie dla działań prowadzonych w celu redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem, co potwierdzają przeprowadzone konsultacje i rozmowy z mieszkańcami i mieszkankami, a także badania przeprowadzone przez Stowarzyszenie POLARIS – OPP, o czym więcej w punkcie 3. Szczególnie dzieci i młodzież z Sopotni Wielkiej biorą czynny udział jako wolontariusze we wszelkiego rodzaju aktywnościach, aby dbać jak najlepiej o środowisko nocne. Przykładem tego jest szerokie zaangażowanie w liczne projekty, warsztaty, konkursy i obserwacje nocnego nieba i inne aktywności prowadzone przez Stowarzyszenie POLARIS – OPP [16].

W Sopotni Wielkiej od 2015 roku [17] funkcjonuje obserwatorium astronomiczne, z którego korzystają mieszkańcy, ale także liczni turyści, którzy wybierają tę miejscowość za cel swojej podróży, właśnie ze względu na istniejący tu obszar czynnej ochrony ciemnego nieba. Skuteczność aktywizacji społecznej jest efektem wieloletniej edukacji oraz licznych warsztatów i prelekcji w tym zakresie. Mieszkańcy i mieszkanki z własnej inicjatywy wymieniają oświetlenie na prawidłowe oraz zgłaszają się po porady w tej kwestii [12].

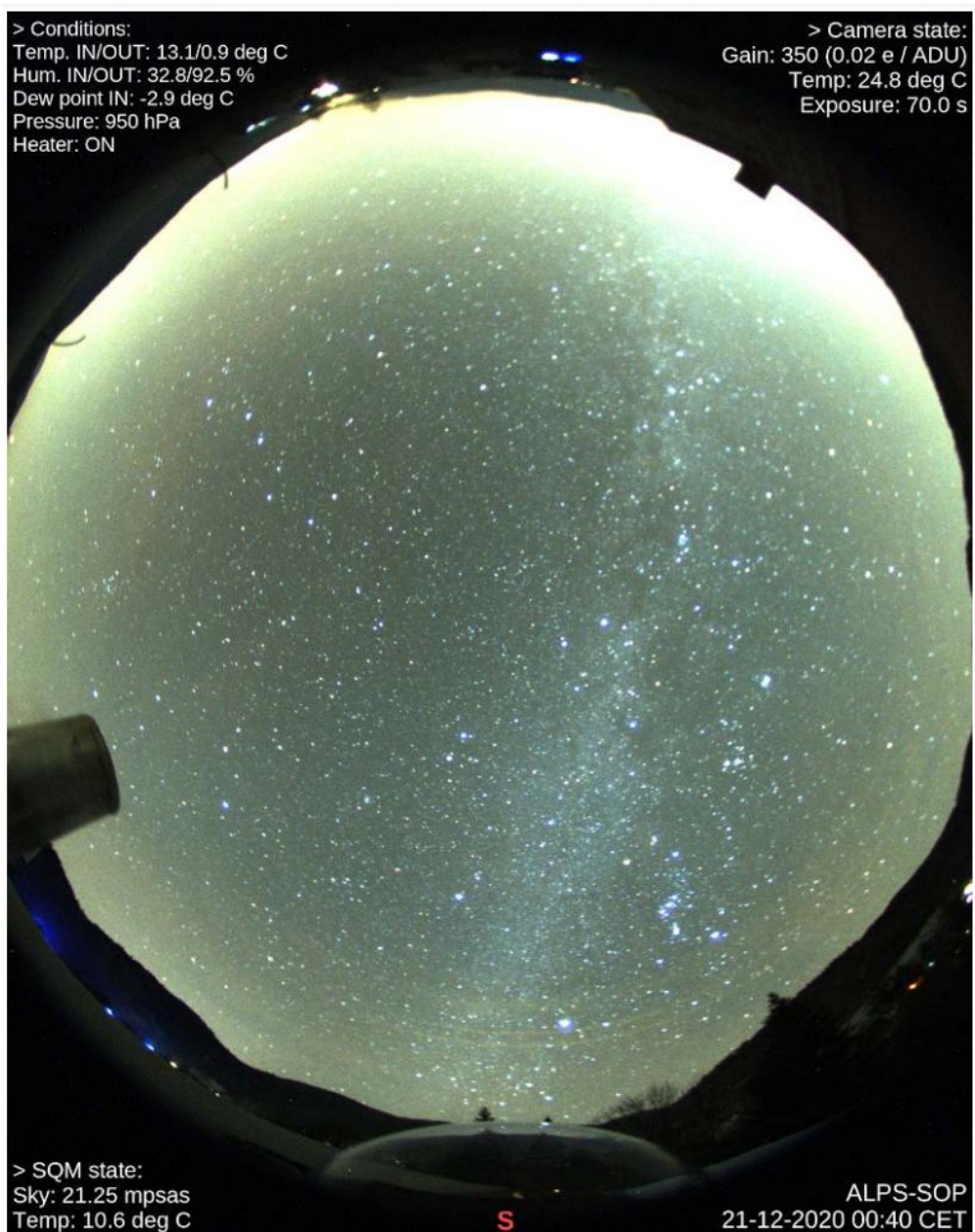
Należy zauważyć, że spełniony jest tutaj trzeci warunek, czyli szerokie poparcie społeczne organizacji oraz władz samorządowych dla uzyskania tytułu International Dark Sky Community. Potwierdzają to także bardzo liczne listy rekomendacyjne m.in. od wójt gminy Anny Wasilewskiej, radnych Gminy Jeleśnia, posłanki Małgorzaty Pępek, sołtysa wsi, dyrektora lokalnej szkoły oraz od Stowarzyszenia LGD – Żywiecki Raj [12]. Poparcie to nabrało również wymiaru międzynarodowego, ponieważ swoją rekomendację złożył znany i doświadczony ekspert w dziedzinie techniki oświetleniowej i ochrony ciemnego nieba – Andrej Mohar, obecnie wiceprezes Dark Sky Slovenia, który został utytułowany przez IDA za osiągnięcia na rzecz redukcji zanieczyszczenia światłem [18]. W tym miejscu warto również podkreślić, iż rada sołecka oraz władze gminy Jeleśnia wielokrotnie okazywały swoje wsparcie nie tylko w formie listu poparcia, ale i za pomocą zawartych porozumień i uchwał rady gminy [12], dzięki czemu publiczne oświetlenie w Sopotni Wielkiej znajduje się wciąż pod pełną kontrolą. Przykłady znaleźć można w załącznikach aplikacji o nadanie tytułu International Dark Sky Community dla tejże miejscowości.

Również bardzo istotnym aspektem są sukcesy w ciągłej kontroli zanieczyszczenia światłem oraz jego regularne pomiary. Co rozumiało, aby utrzymać zadowalający stan minimalnego zanieczyszczenia światłem, konieczny jest rzetelny i bieżący monitoring tego zjawiska. Oświetlenie i zmiany jasności nocnego nieba są regularnie i automatycznie mierzone przez dwie autonomiczne stacje pomiarowe na terenie Sopotni Wielkiej:

- Stacja ALPS (*All-sky Light Pollution Survey*) zlokalizowana na dachu Zespołu Szkół nr 4 przy kopule Obserwatorium Astronomicznego, która została zamontowana przez pracowników Instytutu Astronomicznego Uniwersytetu Wrocławskiego, współpracującego ze Stowarzyszeniem POLARIS – OPP w ochronie ciemnego nieba. Mierzy ona na bieżąco jasność nocnego nieba oraz wykonuje regularne (interwał 3 min) zdjęcia szerokokątne (rys. 4) całego nieboskłonu [19],
- Komora kontrolowanych warunków środowiskowych w ogródku pomiarowym ASTROMETEO nieopodal budynku szkoły, zainstalowana przez koordynatorów działu technicznego Stowarzyszenia POLARIS – OPP i pracowników Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, również czynnie działających na rzecz redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem. Poza rejestrowaniem poziomu irradancji, wyposażona jest w drugie stanowisko dla urządzenia SQM–DL–LU. W tym samym miejscu mierzone są również warunki atmosferyczne oraz stężenia pyłów zawieszonych PM1.0, PM2.5 oraz PM10, które mogą mieć wpływ na rzetelną ocenę jasności nieba [20].

Ponadto członkowie Stowarzyszenia POLARIS – OPP regularnie sprawdzają źródła zanieczyszczenia światła na terenie Sopotni Wielkiej, a także zachęcają właścicieli posesji do montażu czujników ruchu oraz reduktorów mocy, które są również zgodne z dobrymi praktykami ochrony ciemnego nieba. Dokonują oni także pomiarów za pomocą ręcznych urządzeń SQM–L na wyznaczonych miejscach badań (w różnych częściach miejscowości) minimum raz w roku.





Rys. 4. Zdjęcie nocnego nieba z pomiarami, wykonane ze Stacji ALPS-SOP  
Źródło: Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego, Stowarzyszenie POLARIS – OPP.

W tym miejscu należy jednak pokreślić, że potencjalne zanieczyszczenie sztucznym światłem to nie tylko źródła emisji zlokalizowane w danej miejscowości. Negatywne skutki tej emisji występują w postaci kilku zjawisk jako (tłumaczenie zaproponowane przez dr. Sylwestra Kołomańskiego):

- światło niepożądane (ang. *light trespass*) – światło padające w miejsca niedocelowe np. światło z opraw ulicznych wpadające do okien budynków,
- łuna miejska (ang. *skyglow*) – sztuczne rozświetlenie nocnego nieba występujące głównie nad obszarami miejskimi, istnieje przez rozpraszanie sztucznego światła w atmosferze,
- olśnienie, blask (ang. *glare*) – spowodowany emisją światła w górną półprzestrzeń z opraw o budowie ze współczynnikiem ULR  $\neq 0\%$  lub montażem opraw oświetleniowych, co powoduje dyskomfort użytkowników dróg, ogranicza widoczność,
- chaos i zakłócenia świetlne (ang. *light clutter*) – występują najczęściej w dużych miastach, spowodowane nagromadzeniem zbyt dużej ilości źródeł światła na danym obszarze,
- zbyt duża emisja światła (ang. *over-illumination*) [21].

W ramach projektu „Dark Sky Community” podjęto dodatkowo konkretne działania przewidziane w harmonogramie pomiędzy 2020 a 2021 rokiem, nawiązujące do wymagań warunkujących uzyskanie tytułu IDSC. Wykaz najważniejszych czynności przedstawia tabela nr 1.

Tabela 1. Tablica implementacyjna kluczowych działań wdrożeniowych projektu „Dark Sky Community” (nr 2020–1–PL–01–ESC31–080652)

Działania	Terminy	Wskaźniki rezultatu (ilościowe)
Organizacja prelekcji i konsultacji o wpływie sztucznego światła na otoczenie oraz wsparcie grupy inicjatywnej przez prof. dr hab. Krystynę Skwarło-Sońta będące „coachem” projektu Dark Sky Community.	01.05.2020– 30.04.2021	Liczba prelekcji: 3; liczba konsultacji i wsparcia w ramach spotkań zespołowych grupy inicjatywnej: 11.
Konkurs dla dzieci i młodzieży na stworzenie makiet prezentujących metody ochrony ciemnego nieba, tworzonych metodą upcyklingu.	01.05.2020– 31.08.2020	Liczba dzieci <16 r.ż.: 15; liczba osób dorosłych, uczestniczących w konkursie: 7; liczba osób uczestniczących w rozstrzygnięciu i odwiedzających wystawę prac konkursowych: 133.
Pomiary jasności nocnego nieba z ustalonych miejsc w Sopotni Wielkiej z urządzenia SQM–L i porównanie badań z wynikami z lat poprzednich.	01.05.2020– 30.11.2021 oraz 01.03.2021– 30.04.2020	Liczba dni pomiarowych: 6; liczba wykonanych raportów EKO–005 [22]: 13; liczba zaangażowanych osób: 4.

Tabela 1. (cd)

Ewidencja wszystkich, niezgodnych z zasadami Racjonalnej Polityki Oświetleniowej opraw oświetleniowych w miejscowości (sporządzono bazę wraz ze zdjęciami i danymi technicznymi).	01.06.2020–30.11.2020	Liczba zwizytowanych gospodarstw na terenie Sopotni Wielkiej: 26; liczba gospodarstw, w których konieczne było dokonanie poprawek i zmian w oświetleniu zewnętrznym: 4.
Dystrybucja opraw oświetleniowych spełniających wymogi IDSC wraz z konsultacjami i instrukcjami odnośnie ich poprawnego zainstalowania.	01.08.2020–30.04.2021	Liczba gospodarstw, w których udzielono konsultacji i porad: 9; liczba gospodarstw, do których rozdystrybuowano oprawy: 4; liczba rozdystrybuowanych opraw: 6.
Lokalna impreza o charakterze otwartym na terenie Sopotni Wielkiej, promująca redukcję zanieczyszczenia sztucznym światłem.	12.08.2020–15.08.2020	Liczba imprez: 1 (IX. Festiwal Ciemnego Nieba); liczba przeprowadzonych prelekcji nt. wpływu zanieczyszczenia światłem: 5; liczba osób uczestniczących w imprezie w formie bezpośredniej: 78; liczba osób uczestniczących online: 23.
Modernizacja iluminacji lokalnego kościoła, będącego największym źródłem zanieczyszczenia światłem na terenie miejscowości [23].	01.10.2020–30.11.2020	Liczba opraw podlegających wymianie na źródła LED z zastosowaniem dedykowanych masek (osłon przeciwolśnieniowych): 3; liczba obiektów poddanych modernizacji w zakresie sposobu iluminacji fasady: 1.

*Źródło: opracowanie własne na podstawie sprawozdania projektu „Dark Sky Community” grupy inicjatywnej i Stowarzyszenia POLARIS – OPP w Sopotni Wielkiej.*

### 3. Waloryzacja efektów projektowych

Przykład Sopotni Wielkiej i wdrożona na tym terenie redukcja zanieczyszczenia sztucznym światłem w ujęciu kompleksowym, miały za zadanie przede wszystkim wskazać wymierne korzyści oraz stanowić modelowy przykład możliwości, jakie daje odpowiednio dobierana technika oświetleniowa i racjonalne podejście do zarządzania energią elektryczną. W porównaniu z infrastrukturą oświetlenia ulicznego, jakie funkcjonowało do roku 2011 na tym terenie, za sprawą przedmiotowej modernizacji budżet gminy zyskiwał w pierwszych pięciu latach około 9000 zł oszczędności na energii elektrycznej rocznie. Natomiast kluczowym rezultatem miękkim projektu pilotażowego, który finansowany był ze środków PROW 2007–2013, było ukazanie możliwości osiągnięcia równowagi pomiędzy jasnymi ulicami a ciemnym niebem chronionym do celów astroturystyki i nie tylko.

Nie można jednak w tym miejscu pominąć roli społeczności lokalnej i trudnej drogi w uzyskiwaniu konsensusu w innowacyjnym sposobie oświetlania ulic. Niewątpliwie mamy tu do czynienia z sytuacją porównywalną do racjonalnego zarządzania zasobami wodnymi czy ochrony powietrza. Należało najpierw przekonać mieszkańców i mieszkanki o konieczności używania sztucznego światła tylko tam, gdzie

naprawdę jest to potrzebne i w ograniczonych ilościach. Naturalna ciemność stała się swoistego rodzaju dobrem, które należy chronić, podobnie jak czyste powietrze i z takim też przesłaniem grupa działaczy Programu Ciemne Niebo Polska Stowarzyszenia POLARIS – OPP, realizowała żmudny proces edukacji pozaformalnej oraz podnoszenia świadomości społecznej na ten temat już od 2005 roku [24]. Koncepcja pierwszej w Polsce miejscowości z czynną ochroną ciemnego nieba to także – a może przede wszystkim – wyjątkowo wartościowy przykład działań, jak stworzyć poczucie solidarności społecznej wokół tematu, który dla wielu osób może być całkowicie abstrakcyjny, a jednocześnie może stanowić wyjątkowy pomysł dla rozwoju i promocji miejscowości.

W 2020 roku w ramach projektu finansowanego z Europejskiego Korpusu Solidarności (numer 2020–1–PL–01–ESC31–080652 – patrz punkt 2), grupa młodzieży i studentów wspierana przez prof. dr hab. Krystynę Skwarło-Sońta z Uniwersytetu Warszawskiego w roli coacha, podjęła się, we współpracy ze Stowarzyszeniem POLARIS – OPP, ankietyzacji 33 lokalnych gospodarstw z terenu Sopotni Wielkiej. 27 ankietowanych rodzin wskazało zainteresowanie uczestnictwem w czynnej redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem w ramach własnego gospodarstwa, cztery ankiety były neutralne – nie wyrażono krytyki ani też poparcia koncepcji, a jedynie dwie odpowiedzi były negatywne. Wyniki te wskazują na efektywność dotychczasowych aktywności, podejmowanych przez grupę działaczy lokalnych i pasjonatów ciemnego nieba, związanych z podnoszeniem świadomości na temat tego problemu, co w ujęciu ogólnokrajowym może świadczyć o powodzeniu podejmowanych tutaj wysiłków także w wymiarze społecznym. Jak podkreślają w raporcie końcowym autorzy sprawozdania, istotą skutecznej ochrony ciemnego nieba nie jest wyłącznie modernizacja czy całkowita wymiana urządzeń oświetleniowych lub uchwalenie odpowiednich aktów prawnych na poziomie samorządowym, ale przede wszystkim podjęcie skutecznej inicjatywy w tym kierunku z zachowaniem zasady *empowerment* [25].

Jak wskazują wnioski z waloryzacji projektu „Dark Sky Poland”, finansowanego przez Narodowy Instytut Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego (NIW–CRSO) w 2019 roku [26], do uzyskania oczekiwanego efektu czynnej ochrony ciemnego nieba niezbędne jest włączenie samych mieszkańców nie tylko w roli implementacyjnej, ale i również w funkcji strażniczej. Wówczas znacznie szybciej pojawia się reakcja w środowisku lokalnym na łamanie przyjętych zasad, związanych z redukcją zanieczyszczenia sztucznym światłem czy też łatwiej o inicjatywę oddolną przy różnego rodzaju aktywnościach społecznych, zmierzających w kierunku wzmocnienia ochrony ciemnego nieba.

Przykładem takiego zaangażowania z zachowaniem zasady *empowerment* na terenie Sopotni Wielkiej, była zrealizowana w 2020 roku wystawa pneumatycznych modeli planet Układu Słonecznego (nawiązujących do ochrony ciemnego nieba i możliwości ich obserwowania – rys. 5). Wydarzenie to zostało w całości sfinansowane z funduszu sołeckiego w wyniku przeprowadzonego głosowania wśród osób zasiadających w radzie (mieszkańcy Sopotni Wielkiej).



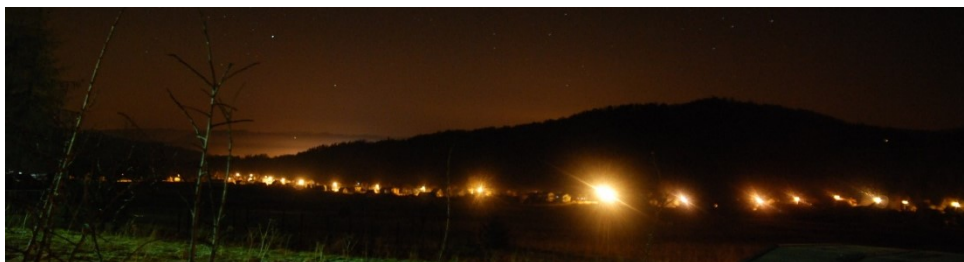
**Rys. 5.** Wystawa modeli planet Układu Słonecznego na terenie Sopotni Wielkiej w październiku 2020 roku, która w wyniku głosowania mieszkańców, sfinansowana została z funduszu sołeckiego

*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo Polska.*

Argument korzyści społecznych nie zawsze przemawia jednak do przedstawicieli jednostek samorządu terytorialnego. Bardzo często istotniejszy okazuje się aspekt ekonomiczny, którym niestety kierują się urzędnicy podejmujący decyzję o sposobie oświetlenia przestrzeni publicznej. W takim przypadku, pomimo iż wskaźnik NPV przy realizacji projektu z dofinansowaniem EFROW został określony na poziomie równym 0, rachunek zysków z oszczędności na energii elektrycznej dla budżetu gminy oszacowany został na poziomie blisko 70 tysięcy zł, biorąc pod uwagę czas trwania projektu równy siedmiu latom. Co więcej, mowa jest tu o sołectwie liczącym niewiele ponad 1800 osób [27] z około 400 gospodarstwami, funkcjonującymi na tym terenie. W dodatku biorąc pod uwagę fakt, że inwestycja była wykonywana jeszcze przed wdrożeniem technologii LED do powszechnego użytku w instalacjach oświetlenia ulic (demontaż łącznie 155 szt. opraw oświetleniowych ze źródłem HPS [ang. *high-pressure sodium*] i montaż 178 opraw HPS ULOR = 0% z redukcją mocy do 20%), wynik ten i tak wydaje się dosyć korzystny. Oprócz budżetu gminy, efekt można także zauważyć bezpośrednio w jeszcze jednym wymiarze – ochronie krajobrazu nocnego.

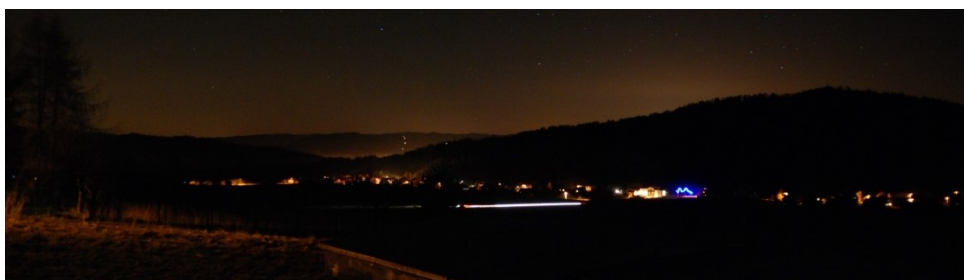
Obszar miejscowości Sopotnia Wielka leży w całości na terenie Żywieckiego Parku Krajobrazowego oraz w znacznej części na obszarach Natura 2000. Dzięki zastosowaniu opraw oświetleniowych emitujących strumień świetlny wyłącznie w dolną półprzestrzeń oraz zainstalowaniu ich pod kątem 0° (co było możliwe dzięki zastosowaniu odpowiednich wysięgników), zredukowano charakterystyczną, pomarańczową poświatę w naturalnie ciemnym środowisku nocnym. Nocną panoramę Sopotni Wielkiej przed i po modernizacji oświetlenia ulicznego zamieszczono na rysunkach 6 i 7, gdzie na pierwszym planie zauważyć można początkowo nieosłonięte i niepoprawnie zamontowane

źródła światła (rys. 6), a następnie światło skierowane w dół (rys. 7). Co istotne, na obu ujęciach mamy do czynienia z taką samą ilością punktów oświetlenia ulicznego, a więc nie nastąpiła ich likwidacja, lecz racjonalne wykorzystanie (emitowane światło ukierunkowano tam, gdzie rzeczywiście powinno być skierowane). Widoczna na drugim planie łuna na niebie pochodzi niestety już z sąsiedniej miejscowości Jeleśnia, nie objętej wówczas opisywaną modernizacją.



**Rys. 6.** Panorama Sopotni Wielkiej w dzielnicy Kamieniec przed modernizacją oświetlenia ulicznego w miejscowości

*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo Polska.*



**Rys. 7.** Panorama tej samej części miejscowości po dokonaniu zmian w publicznej infrastrukturze oświetleniowej

*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo Polska.*

Urząd Gminy Jeleśnia od 2009 roku czynnie wspiera rozwój nadal rzadko spotykanej w skali kraju, tak zwanej astroturystyki i ochrony ciemnego nieba. Przykładem wartości dodanej jest między innymi wykonana w 2016 roku wspólna inwestycja Stowarzyszenia POLARIS – OPP oraz Gminy Jeleśnia, w ramach której powstała kopuła obserwatorium astronomicznego z jednym z większych teleskopów w regionie (14-calowy Schmidt–Cassegrain), a także funkcjonująca nieopodal od 2017 roku sala wielofunkcyjna z biblioteką oraz punktem monitoringu jasności nocnego nieba [12, 17, 19]. Oba podmioty zapewniają utrzymanie stałego personelu tego

kompleksu na poziomie 50/50 dla wskaźnika 1,125 RJR. Swego rodzaju przykładem rozwoju branży turystycznej związanej z ochroną ciemnego nieba i astronomią obserwacyjną jest także coroczna, organizowana od blisko 10 lat, otwarta impreza plenerowa pod nazwą Festiwal Ciemnego Nieba. Wydarzenie to organizowane jest zawsze w okresie nowiu Księżyca, przypadającego najbliżej maksimum aktywności meteorów z roju Perseid i skupia nawet do 500 osób, które przybywają w jeden tylko weekend do Sopotni Wielkiej. Na podstawie danych Stowarzyszenia POLARIS – OPP za 2018 rok [24], łączną liczbę osób zainteresowanych dziedziną astroturystyki przybywającą do Sopotni Wielkiej szacuje się nawet na poziomie 2500 osób w ciągu roku.

Należy również wspomnieć o niepowodzeniach inicjatywy związanej z utworzonym obszarem czynnej ochrony ciemnego nieba. W społeczności lokalnej w Sopotni Wielkiej zdarzają się również osoby, które celowo oświetlają swoje posesje na przekór wytycznym przyjętym w uchwale rady sołeckiej z 2011 roku oraz zapisom Racjonalnej Polityki Oświetleniowej z 2021 roku. Z uwagi na brak przepisów polskiego prawa (stan na 2021 rok) o sankcjonowaniu zanieczyszczenia sztucznym światłem, udaje się jedynie przekonać postępujące tak osoby do wygaszania tego typu oświetlenia w późnych porach nocnych, podobnie jak dzieje się to z oświetleniem ulicznym. Pozytywną informacją jest fakt, że na około 400 funkcjonujących gospodarstw w miejscowości, są tylko trzy przypadki działania na niekorzyść inicjatywy ochrony ciemnego nieba.



**Rys. 8.** Wizyta zespołu technicznego Programu Ciemne Niebo Polska w jednej z nowo wybudowanych nieruchomości na terenie Sopotni Wielkiej, celem dokonania pomiarów i modernizacji oświetlenia przydomowego

*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo Polska.*

Zupełnie odmiennym i pozytywnym aspektem jest natomiast odnotowanie już siedmiu przypadków rodzin (w tym aż czterech z okresu pandemii COVID-19 na przełomie 2020/2021), które przeprowadziły się na teren w Sopotni Wielkiej z powodu czynnej ochrony naturalnej ciemności nocy. Osoby te zdecydowały się zakupić działkę pod budowę własnego domu lub nabyły istniejącą już nieruchomość. Po kontakcie z działaczami Programu Ciemne Niebo Polska zgłaszają się z chęcią uczestnictwa w redukcji zanieczyszczenia światłem i kierują prośby o poradę, jakie oprawy oświetlenia zewnętrznego wybrać, aby nie szkodziły środowisku nocnemu. Zdarzają się także przypadki, że posesje te nie są w ogóle oświetlane na zewnątrz.

Wśród mieszkańców i mieszanek Sopotni Wielkiej jest również coraz większa grupa rodzin, które przyłączają się do czynnej ochrony ciemnego nieba, wymieniając nawet oprawy oświetleniowe o niskiej mocy i konstrukcji z ULOR > 0% i uczestnicząc w realizowanych przez Stowarzyszenie POLARIS – OPP projektach tematycznych z dziedziny redukcji zanieczyszczenia światłem. W ramach pozyskanych dotacji z NIW–CRSO na wspomniany już projekt pt. „Dark Sky Poland” w 2019 roku, deklaracje o bezpośrednie przyłączenie do programu złożyło aż 56 gospodarstw (włączono je do czynnej redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem, poprzez wymianę lub dostosowanie oświetlenia zewnętrznego, instalację reduktorów mocy, czujników ruchu itp.) [26].

W 2021 roku na terenie Sopotni Wielkiej rozpoczęto realizację kolejnego projektu pod nazwą „Racjonalna polityka oświetleniowa w praktyce”, finansowanego przez Islandię, Liechtenstein i Norwegię z Funduszy EOG w ramach Programu Aktywni Obywatele - Fundusz Regionalny [29]. Jednym z głównych działań tego przedsięwzięcia jest zaangażowanie kolejnych 150 gospodarstw i ponad 500 mieszkańców w czynną redukcję zanieczyszczenia światłem. Ponadto, pod koniec 2021 roku powołana została pierwsza, branżowa rada dialogu społecznego na rzecz tzw. ekologii nocy. Również w ramach tego samego projektu powstał międzynarodowy think tank z udziałem ekspertów i ekspertek z Norwegii, Słowenii oraz Polski. W efekcie ich zaangażowania, opracowywane są rekomendacje związane z nietypowymi rozwiązaniami oświetlenia przestrzeni publicznej, jak i prywatnej, dzięki którym można ograniczyć efekt światła niepożądanego (np. minimalizowanie zjawiska albedo na stokach narciarskich czy negatywnego wpływu na przyrodę tzw. sezonowych ogrodów światła [30] itp.). Projekt będzie realizowany do końca 2023 roku z możliwością jego wydłużenia o kolejne etapy współpracy transgranicznej i międzynarodowej.

Wszystkie przedstawione aktywności mają miejsce bezpośrednio na terenie miejscowości Sopotnia Wielka w gminie Jeleśnia, która od 2019 roku bezskutecznie oczekuje na pozytywne rozpatrzenie aplikacji o nadanie tytułu International Dark Sky Community organizacji IDA z siedzibą w USA. Niestety, z przyczyny przedłużających się procedur, zmian personalnych w tejże organizacji i braku regulacji prawnych zjawiska zanieczyszczenia światłem w Polsce, proces ten nadal nie został zakończony (stan na luty 2022 roku).





**Rys. 9.** Przykład prawidłowo zainstalowanych opraw oświetleniowych (zgodnie z zasadami IDSC) na jednej z wielu posesji w Sopotni Wielkiej

*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Program Ciemne Niebo Polska.*

#### **4. Problemy procesu aplikowania o tytuł IDSC i precedens Sopotni Wielkiej – badanie porównawcze z IDSC Møn i Nyord w Danii**

Analizując działania na rzecz ochrony ciemnego nieba, Sopotnia Wielka zdaje się być fenomenem na skalę krajową, a nawet i europejską. Wysiłki na rzecz redukcji zanieczyszczenia światłem zapoczątkowane przez Stowarzyszenie POLARIS – OPP trwają w tym miejscu z sukcesami już od prawie dwudziestu lat. Miejscowość jest również prekursorem idei tworzenia obszarów czynnej ochrony ciemnego nieba w Polsce, które zaczęły powstawać dopiero po tym, jak w Sopotni Wielkiej dokonano modernizacji oświetlenia publicznego [26]. Dostrzegła to również organizacja IDA w swojej recenzji wstępnej z 2021 roku, czego dowodem jest spełnienie wszystkich wymagań do uzyskania tytułu IDSC, oprócz jednego zastrzeżenia, które zgłosił ówczesny koordynator – Adam Dalton [12]. Zdaniem oceniającego, nie tylko spełniono standardy IDA, ale i pokazano respekt dla najlepszych praktyk ochrony ciemnego nieba i postawiono wysoką poprzeczkę dla innych aplikacji IDSC. Zastrzeżeniem do aplikacji był brak odpowiedniej polityki oświetleniowej.

Z konsultacji przeprowadzonych na przełomie 2020/2021 roku pomiędzy przedstawicielami społeczności Sopotni Wielkiej oraz IDA, jasno wynikało, że polityka oświetleniowa ma zastosowanie obowiązkowe na terenie całej miejscowości,

a przede wszystkim odnosi się do oświetlenia publicznego. Natomiast gdy brakuje przepisów dotyczących redukcji zanieczyszczenia światłem na szczeblu krajowym, zmiana oświetlenia prywatnego odbywa się na zasadach dobrowolności, gdyż nie można tego skutecznie egzekwować. Podobny precedens miał miejsce w stanie Teksas w USA (co przywołano jako przykład podczas toczących się konsultacji między przedstawicielami IDA i reprezentantami Stowarzyszenia POLARIS – OPP).

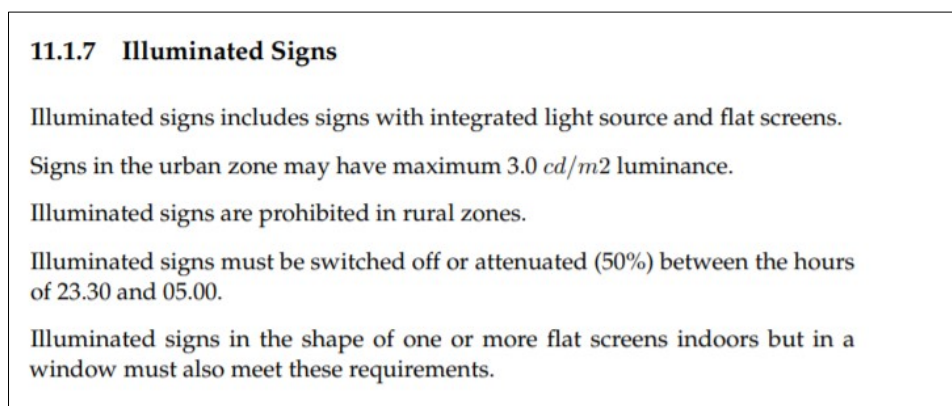
Kluczowe jest jednak w tym przypadku opracowanie minimalnych wymagań dotyczących redukcji zanieczyszczenia światłem, do których należy zachęcać i nakłaniać mieszkańców, jak i innych właścicieli urządzeń oświetleniowych. Próżno jednak szukać w tego typu politykach IDSC, zapisanych wprost sankcji za nieprzestrzeganie określonych wytycznych, a więc co do zasady w wielu przypadkach wytyczne te mogą być nieskuteczne lub nie do wyegzekwowania, tak jak to ma miejsce z § 293 ust. 6 rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 roku (Dz.U. nr 75, poz. 690). Zarówno wcześniejszy zapis z 2009 roku, mówiący o natężeniu oświetlenia skierowanego na elewację budynku zawierającego okna, który nie mógł przekroczyć 5 luksów dla światła białego i 3 luksów w przypadku kolorowego, jak i dzisiejsze brzmienie o oświetleniu wystaw i reklam świetlnych [31], były i są praktycznie „martwym prawem”. Przywołana powyżej nowelizacja z 2009 roku, określająca limity natężenia, spełniała wprost kryterium *desuetudo* i liczne próby ich egzekwowania, które w postaci interwencji do inspektoratów nadzoru budowlanego w wielu miejscach w kraju prowadził Program Ciemne Niebo Stowarzyszenia POLARIS – OPP od 2010 roku [32], pozostawały bez rozpatrzenia lub kończyły się odmową wszczęcia postępowania. A zatem trudno wymagać od polityki oświetleniowej IDSC bezwzględnego obowiązkowego stosowania w kraju, gdzie jedyny zapis w prawie budowlanym mówiący o sposobie używania sztucznego światła jest praktycznie nieegzekwowalny. Nietrudno więc wywnioskować, że w takim przypadku wszystko zależy od dobrej woli społeczności, która aplikuje o tytuł IDSC, co zresztą zostało wyrażone w uchwale sołeckiej z 2011 roku oraz Racjonalnej Polityce Oświetleniowej, funkcjonującej jako zalecenia dla mieszkańców i/lub właścicieli posiadających nieruchomości na terenie Sopotni Wielkiej [12].

Stanowisko International Dark-Sky Association wobec tej kwestii było zbieżne z polskim punktem widzenia dla rozumienia wymogu obowiązkowego stosowania wytycznych polityki oświetleniowej i do momentu zmiany menedżera IDSP w osobie Adama Daltona w IDA, warunek ten nie był punktem determinującym uzyskanie nominacji. Sytuacja zmieniła się jednak w momencie, gdy w marcu 2021 roku pierwszą polską aplikację o status międzynarodowej społeczności ciemnego nieba przejął nowy recenzent – John Barentine. Od tego momentu stanowisko IDA uległo znacznemu zaostrzeniu i poczynione wcześniej ustalenia z okresu 2019 i 2020 roku, okazały się na nowo rozpatrywane z bardziej restrykcyjnym podejściem do spraw związanych z polityką oświetleniową. Nowy menedżer zażądał dowodów na to, że prywatni właściciele mają obowiązek stosować się do *Lighting Policy* IDA, pomimo przedstawionych wcześniej informacji o prawnym braku możliwości egzekwowania ww. wytycznych,

a nawet opinii ministerstwa czy środowisk prawniczych z Polski [15]. Z końcem 2021 roku po raz kolejny zmieniła się osoba rozpatrująca aplikację o tytuł IDSC dla Sopotni Wielkiej. Obowiązki Johna Barentine przejęła tym razem Ashley Wilson w funkcji *Director of Conservation*, reprezentująca od tego momentu stanowisko IDA w tym zakresie, co również nie pozostało bez wpływu na postrzeganie interpretacji wytycznych dla polityki oświetleniowej.

Te liczne zmiany personalne osób koordynujących proces nadawania tytułu IDSC i niespójność przekazu ze strony IDA, była powodem do przeprowadzenia przekrojowego badania podobnej aplikacji procedowanej przez ww. organizację na tych samych zasadach, co wniosek z Sopotni Wielkiej. Jako próbę badawczą przyjęto istniejącą społeczność ciemnego nieba z przyznaniem już tytułem w Danii – Møn i Nyord [33], zaś metodą była analiza komparatystyczna treści zaakceptowanej oraz upublicznionej aplikacji wraz z załącznikami. Autorzy badania skupili się jedynie na rozbieżnościach z ogólnie przyjętymi zasadami dla IDSC (obowiązującymi od 2018 roku), z jednoczesnymi zastrzeżeniami zgłaszanymi przez kolejnych menedżerów IDA w tym samym przedmiocie wobec polskiej aplikacji [12].

Pierwszym z istotnych zastrzeżeń jest oświetlenie tablic i znaków, które w Møn i Nyord są wyłączane między godz. 23:30, a 5:00 rano. W Sopotni Wielkiej godziny te określono między 0:00, a 4:00 rano, tak jak całe oświetlenie uliczne, z uwagi na kursujące autobusy z pracownikami powracającymi z nocnej zmiany i udającymi się do pracy rano. Mimo to opinia IDA w tym przypadku jest negatywna, jako niezgodna z wytycznymi, które mówią o adaptacji wygaszania do „godzin biznesowych” oraz całkowitym wygaszeniu oświetlenia. Nasuwa się zatem pytanie, dlaczego w przypadku Danii dopuszczono częściowe wygaszanie oraz równie krótki przedział czasowy (rys. 10).








**Rys. 10.** Fragment polityki oświetleniowej z IDSC w Danii

*Źródło: Aplikacja Møn i Nyord.*



Dodatkowo należy zauważyć, że w Racjonalnej Polityce Oświetleniowej dla Sopotni Wielkiej nie ma mowy bezpośrednio o oświetleniu tablic i znaków, gdyż te najwyczejajniej nie występują, podobnie jak stadiony, lotniska, dworce kolejowe czy latarnie morskie. Jeśli zatem taki element nie występuje na danym obszarze, to wydaje się zasadne pominięcie takiego przypadku w wytycznych. Za podstawę posłużyła wcześniejsza ewidencja urządzeń emitujących sztuczne światło do otoczenia zewnętrznego na terenie Sopotni Wielkiej, która nie wykazała tego typu instalacji. Istotnym jest również fakt prowadzenia stałego monitoringu istniejących i nowych źródeł sztucznego światła w miejscowości, co oczywiście zostało uwzględnione w polskiej aplikacji [12].

Drugim precedensem, nad którym warto się także pochylić jest – kluczowy z poziomu ochrony ciemnego nieba – katalog przykładowych opraw oświetlenia zewnętrznego dopuszczony do użytku w Møn i Nyord. Mogą to być urządzenia o temperaturze barwowej do 4000 K oraz akceptowalne są oprawy z bardzo silnym źródłem światła, którego strumień świetlny może wynosić aż 4000 lm (rys. 11). W dodatku są to oprawy, których budowa nie odcina w pełni strumienia świetlnego do góry (rys. 12), a co za tym idzie, nie spełniają zasady  $ULR = 0\%$ . Należy zauważyć, że są to warunki techniczne ujęte w polityce oświetleniowej zaakceptowanej już aplikacji, a jednocześnie niezgodne z wytycznymi IDA, gdzie mowa jest o „całkowitym osłonięciu od góry opraw o strumieniu świetlnym ponad 1000 lumenów”. Dopuszczone zostały również oprawy świecące prosto do góry o mocy 8W, a zatem dozwolone w wymaganiach IDA. Jednakże koncepcja opraw skierowanych prosto w nocne niebo zdaje się zaprzeczać idei jego ochrony, gdyż nie ma określonego limitu liczby takich źródeł sztucznego światła. Zgodnie z informacjami z aplikacji Møn i Nyord, 77% opraw oświetlenia publicznego w tej społeczności spełnia wymóg  $ULR = 0\%$  oraz tylko 20% spełnia wymóg temperatury barwowej równej lub mniejszej niż 3000 K. Dopuszczone są również częściowe przygaszenia opraw ulicznych zamiast ich całkowitego wygaszenia.

Dla porównania, w Sopotni Wielkiej 100% opraw oświetleniowych (publicznych) spełnia wymóg temperatury barwowej mniejszej lub równej 3000 K (*de facto* w większości jest to nawet około 2000 K z uwagi na zastosowanie opraw HPS o mocy 70 W) oraz żadna oprawa nie emituje światła ponad horyzont astronomiczny (płaszczyzna szyby oprawy jest prostopadła do osi pionu).

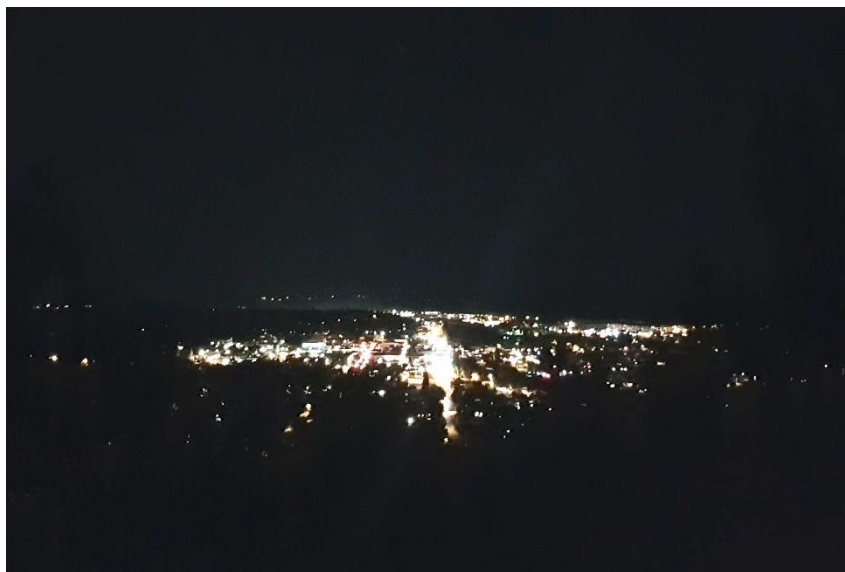
Type	Total number	Data light source	UL %	UH %	Photo	Note
SGS 201 SONT 70	4	HID, 50W, 2000-2100K	0	0		a
Copenhagen LED Mini	5	LED 31W, 3000K	0	0		
LP Pullert 50W	15	HID, 3500K, 4000 lumen	0	0		
GV66	15	CFL, 42W, 4000K, 3200 lumen	<5	0		
GV64	102	HID, Mercury Vapor, 3500K, 4000 lumen	<5	0		

Rys. 11. Przykładowe oprawy oświetleniowe w Møn i Nyord  
*Źródło: Aplikacja Møn i Nyord.*

LED projector up-light	20	LED, 8W	20	80		
Helios	40	QL Helios	<10	0		

Rys. 12. Przykładowe oprawy oświetleniowe ULR  $\neq$  0% w Møn i Nyord  
*Źródło: Aplikacja Møn i Nyord.*

Argumentem przemawiającym za odrzuceniem ww. badania porównawczego mogłoby być twierdzenie, iż dotyczy to dwóch różnych, znacznie odmiennych od siebie lokalizacji oraz upływu blisko pięciu lat od momentu nadania tytułu IDSC dla społeczności Møn i Nyord względem rozpatrywanej w 2021 roku aplikacji Sopotni Wielkiej. Kontrargumentem może być zatem fakt, że w tym samym czasie (2019 rok) IDA uznała jedną z kolejnych europejskich lokalizacji jako społeczność ciemnego nieba. Chodzi o blisko siedemdziesięciotysięczne miasto Fulda w Niemczech, którego aplikacja wzorowana była [34] na pierwszej miejscowości ciemnego nieba, tj. Flagstaff w stanie Arizona (rys. 13).



**Rys. 13.** Nocna panorama miasta Flagstaff w USA, widoczna ze wzgórza Lowell Observatory, sierpień 2017 rok

*Źródło: Stowarzyszenie POLARIS – OPP.*

Na terenie Fuldy zmodernizowano tylko część oświetlenia zewnętrznego i znaczna liczba z ponad 8,5 tys. źródeł światła nadal czeka na wymianę bądź dostosowanie do wymogów stawianych przez International Dark-Sky Association. Ze względu na rozmiary miasta i wynikające z tego problemy logistyczno-finansowe przy modernizacji sieci oświetleniowej, IDA zgodziła się przyznać miastu tymczasowy status międzynarodowej społeczności ciemnego nieba. W zamian miasto jest zobowiązane do całkowitego dostosowania się do wymogów stawianych przez IDA do końca 2027 roku [35]. Można więc wyciągnąć wnioski o „podwójnych standardach” stosowanych podczas rozpatrywania wniosków o IDSC przez IDA w tym samym czasie. Być może przyczyniły się do tego opisywane zmiany personalne w tejże organizacji na stanowisku menedżerów IDSP, czego byliśmy już świadkami w poprzedniej dekadzie,

gdy Stowarzyszenie POLARIS – OPP prowadzące Program Ciemne Niebo – Polska, było przez wiele lat organizacją partnerską IDA (2009–2015) [36].

## 5. Podsumowanie

Wprowadzona w 2011 roku czynna ochrona ciemnego nieba przed zanieczyszczeniem sztucznym światłem w miejscowości Sopotnia Wielka dała ogromny potencjał społecznym aktywnościom, przysłużyła się promocji i bezpłatnej reklamie w mass mediach, otworzyła drogę ku innowacyjnym formom rozwoju turystyki lokalnej, a także przyczyniła się do zachowania cennych walorów przyrodniczych, krajobrazowych czy edukacji nieformalnej z zakresu astronomii i dziedzin pokrewnych. Chronione ciemne niebo stało się swoistego rodzaju wizytówką tejże miejscowości, wskazywaną często na równi ze znajdującym się również w tym miejscu, największym w Beskidach wodospadem [37].

Koncepcja ta jest niewątpliwie unikatowym przykładem, jak powinna wyglądać realizacja działań zmierzających do uzyskania międzynarodowego tytułu Dark Sky Community. O ile w Polsce można spotkać liczne już obserwatoria astronomiczne (zarówno prywatne jak i publiczne), to jednak nie ma drugiej takiej miejscowości, w której do zachowania odpowiednich walorów nocnego nieba w kontekście redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem, lokalne władze podeszły w sposób systemowy i strategiczny.

Inicjatywa Dark Sky Community na terenie naszego kraju stała się faktem dawno temu. Kluczowe jest w tym przypadku pytanie, czy istotniejsze są przepisy oświetleniowe na papierze, czy też faktyczny stan ochrony ciemnego nieba w danej miejscowości, gdyż niewątpliwie pomimo upływu lat, w Polsce nadal świadomość o zagrożeniach, jakie niesie ze sobą zanieczyszczenia sztucznym światłem jest bardzo niska [38]. Dlatego też zasadne jest podejmowanie tego typu inicjatyw, które będą rozpoznawalne w coraz szerszym środowisku społecznym. Korzyści ekonomiczne, przyrodnicze, popularnonaukowe czy zdrowotne to tylko część palety pozytywnych efektów, gdy mowa o „czynnej redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem”. Nie bez powodu pojęcie to jest używane przez działaczy i działaczki Programu Ciemne Niebo Polska Stowarzyszenia POLARIS – OPP w takiej kombinacji słów, gdyż od przeszło 15 lat rozróżniamy dwa rodzaje takiej redukcji:

- bierną – gdzie sprzęt oświetleniowy jest wyłączany całkowicie, w celu zaprzestania emisji zanieczyszczenia światłem i przez zarządców, właścicieli takich urządzeń czy samorządy uznawane jest to mylnie jako poprawne rozwiązanie problemu, jednak sprzeczne z oczekiwaniami społecznymi, a więc doraźne i nieskuteczne,
- czynną – gdzie poprzez rozsądne projektowanie, właściwy dobór opraw oświetleniowych oraz szereg innych czynności przedstawionych w tym artykule, można uzyskać oczekiwaną równowagę pomiędzy oświetloną przestrzenią użytkową (społeczną) a naturalnie ciemnym otoczeniem, które powinno takim pozostać.

Przykład oświetlenia zewnętrznego w Sopotni Wielkiej to swoistego rodzaju hybryda tych dwóch rozwiązań, ale z dominacją tej drugiej, mając na względzie znaczną przewagę czasu, gdy oświetlenie publiczne jest włączone, a więc w ciągu całego wieczoru i drugiej części nocy.

Zasadne jest więc twierdzenie, że warto w ten sposób pokazywać, iż można również wdrażać zrównoważone dysponowanie światłem sztucznym nie tylko jako samą energią elektryczną, ale jako strumieniem świetlnym. Innymi słowy – nie tylko ekonomizacja instalacji stanowi za podstawę zrównoważonego oświetlenia, ale i to, w jakim kierunku oraz w jaki sposób tym światłem się dysponuje.

## Literatura

- [1] International Dark-Sky Association – *IDSC Guidelines*  
<https://www.darksky.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2021/05/IDSC-Final-May-2021.pdf> (dostęp: 05.05.2021).
- [2] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Program Ciemne Niebo – Polska*  
<https://ciemneniebo.pl/pl/o-programie> (dostęp: 20.02.2022).
- [3] Prystrom J., *Innowacje ekologiczne a ochrona środowiska wobec wyzwań XXI wieku na przykładzie strategii Unii Europejskiej*. *Ekonomia i Środowisko*, 2013, 1 (44), s. 81–90.
- [4] Nawalkowski P., *Light pollution, czyli ciemna strona miasta*, *Zieleń Miejska*, 2016, 7–8, s. 54–57.
- [5] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Programy własne – Ciemne Niebo*  
<https://www.polaris.org.pl/programy/ciemne-niebo-cn> (dostęp: 04.11.2009).
- [6] Ścieżor T., *Zanieczyszczenie światłem – ważny problem interdyscyplinarny – wstęp*, *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych*, 2015, 64, 4 (309), s. 521–522.
- [7] Caputa J., Waligóra A., Nawalkowski P., *Wymiana opraw oświetleniowych o mocy 70 W pod obszar ciemnego nieba*. Specyfikacja Techniczna SIWZ, D–07.07.01 OŚWIETLENIE DRÓG UG Jeleśnia, 2011, s. 2–8.
- [8] Sachs D., *From Millennium Development Goals to Sustainable Development Goals*, *Lancet*, 2012; 379, s. 2206–2211.
- [9] Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Cele Zrównoważonego Rozwoju – SDGs*,  
<https://www.gov.pl/web/klimat/cele-zrownowazonego-rozwoju-sdgs> (dostęp: 20.02.2022).
- [10] Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, *Program rozwoju obszarów wiejskich na lata 2007–2013 (PROW 2007–2013)*, Warszawa, 2011, s. 122–124.
- [11] International Dark-Sky Association, *International Dark Sky Places*  
<https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/> (dostęp: 05.03.2021).
- [12] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Application for Designation as International Dark Sky Community Sopotnia Wielka i załączniki*  
<https://polaris.home.pl/pub/DarkSkyCommunity/> (dostęp: 30.03.2021).
- [13] Szlachetko K. (red), *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego*, Instytut Metropolitalny, Gdańsk, 2022.
- [14] Wolters Kluwer, *Prawo.pl* <https://www.prawo.pl/samorzad/zanieczyszczenia-swiatlem-sztucznym-sa-zagrozeniem-a-prawo,506741.html> (dostęp: 20.02.2022).



- [15] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, *Interpelacja nr 1818 w sprawie stanu legislacji w kwestii tzw. zanieczyszczenia światłem w Polsce*, <https://www.sejm.gov.pl/sejm9.nsf/interpelacja.xsp?typ=INT&nr=1818> (dostęp: 20.02.2022).
- [16] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *działania programu Przybliżmy Dzieciom Niebo* <https://polaris.org.pl/component/search/?searchword=ciemne%20niebo&searchphrase=all&Itemid=101> (dostęp 20.02.2022).
- [17] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Sprawozdanie z otwarcia Obserwatorium Astronomicznego w Sopotni Wielkiej* <https://polaris.org.pl/dzialy--tematyczne/dzial--lokalny--sopotnia--wielka/218--otwarcie--obserwatorium--astronomicznego--w--sopotni--wielkiej> (dostęp: 20.02.2022).
- [18] International Dark-Sky Association, *Announces 2019 Award Winners*, <https://www.darksky.org/ida--announces--2019--award--winners/> (dostęp: 30.09.2019).
- [19] Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego, *ALPS* [http://alps.astro.uni.wroc.pl/alps\\_sop/](http://alps.astro.uni.wroc.pl/alps_sop/) (dostęp 20.02.2022).
- [20] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Pomiary stanu środowiska naturalnego na terenie Sopotni Wielkiej* <http://www.polaris.home.pl/pomiary/> (dostęp 20.02.2022).
- [21] Kołomański S., *Zanieczyszczenie światłem i ciemność*. Prace i Studia Geograficzne, 2014, 53, s. 29–46.
- [22] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Dział ekologiczny – Raporty i formularze* <http://www.polaris.home.pl/dokumenty/eko--005--aktywny.pdf> (dostęp: 12.04.2020).
- [23] Program Ciemne Niebo Polska, *Mapy sztucznego światła* <https://ciemneniebo.pl/pl/mapy--sztucznego--swiatla> (dostęp: 20.02.2022).
- [24] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Sprawozdania z działalności* <https://www.polaris.org.pl/34--sprawozdania--z--dzialalnosci> (dostęp: 05.02.2022).
- [25] Noga W., Bończyk P., Nawrat A., Konior J., Krzeszowiak N., Nawalkowski P., *Ewaluacja projektu „Dark Sky Community” – Raport Końcowy EKS grupy inicjatywnej*, Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Sopotnia Wielka 2021.
- [26] Program Ciemne Niebo, *Projekt “Dark Sky Poland”*, <https://ciemneniebo.pl/pl/artykuly/323--projekt--dark--sky--poland> (dostęp: 03.02.2022).
- [27] Urząd Gminy Jeleśnia, Referat Oświaty, Ewidencji Ludności, USC, *Działalności Gospodarczej. Stan na dzień 31.12.2018*.
- [28] Urania – Postępy Astronomii, *Astroturystyka – rodzaje* <https://www.uraniam.edu.pl/astroturystyka/astroturystyka--rodzaje.html> (dostęp: 03.02.2022).
- [29] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, *Xølotl* <https://www.polaris.org.pl/projekty/81--xolotl> (dostęp: 06.02.2022).
- [30] Wonderful Lighting Sp. z o.o., *Ogród Światel*, <https://ogrodswiatel.pl/> (dostęp: 01.02.2022).
- [31] Kancelaria Sejmu RP, *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. nr 75, poz. 690)*.
- [32] Program Ciemne Niebo – Polska, *Nowe światło w sprawie... światła*. <https://ciemneniebo.pl/pl/dzialania--w--polsce/160--nowe--wiato--w--sprawie--wiata> (dostęp: 01.02.2022).
- [33] International Dark-Sky Association, *Møn and Nyord (Denmark)* <https://www.darksky.org/our--work/conservation/idsp/communities/monandnyord/> (dostęp: 05.02.2022).

- [34] International Dark-Sky Association, *Fulda (Germany)* <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/communities/fulda-germany/> (dostęp: 05.02.2022).
- [35] International Dark-Sky Association, *Fulda, Germany Earns International Dark Sky Community Status, First in the Country* <https://www.darksky.org/fulda-germany-earns-international-dark-sky-community-status-first-in-the-country/> (dostęp: 05.02.2022).
- [36] Internet Archive, *International Dark Sky Association, Affiliates*, <https://web.archive.org/web/20090529022155/http://www.darksky.org/mc/page.do?sitePagelD=56419&orgId=idsa> (dostęp: 05.02.2022).
- [37] Wikipedia, *Sopotnia Wielka* [https://pl.wikipedia.org/wiki/Sopotnia\\_Wielka](https://pl.wikipedia.org/wiki/Sopotnia_Wielka) (dostęp: 04.02.2022).
- [38] Zespół Badań Społecznych TNS Polska na zlecenie Ministerstwa Środowiska, *Raport Problem hałasu, odoru i zanieczyszczenia światłem w oczach Polaków*, Warszawa, 2015, s. 13–17.

## DARK SKY COMMUNITY SOPOTNIA WIELKA – THE FIRST ACTIVE DARK SKY PROTECTION COMMUNITY IN POLAND. CONCLUSIONS AND VALORIZATION OF ACTIONS 10 YEARS AFTER PUBLIC LIGHTING MODERNIZATION

**Abstract:** In 2021, 10 years have passed since the full modernization of street lighting for the dark sky protection area in Sopotnia Wielka. After many years, it is still the only place in Poland where comprehensive changes have been made in the lighting infrastructure, effectively reducing light pollution. The study presents the issue of valorizing the activities undertaken over the past few years with selected grant projects implemented by POLARIS – OPP Association. The authors present actions taken in correlation with the guidelines that must be met by the community applying for the IDSC title to the International Dark-Sky Association. However, the issue goes beyond the application developed in 2021 for the above-mentioned title, which was done as part of the project with the support of the ESC program of the European Commission. The conclusions concern the benefits of the actions taken, as well as the obstacles that local communities interested in active dark-sky protection have to face.

**Keywords:** dark-sky, Sopotnia Wielka, IDSC, IDA, POLARIS – OPP.



# WHO IS WHO W TEMACIE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM SZTUCZNYM NA ŚWIECIE I W POLSCE

Karolina M. Zielińska-Dąbkowska

Wydział Architektury, Politechnika Gdańska  
ILLUME, Centrum EkoTech, Politechnika Gdańska  
*k.zielinska-dabkowska@pg.edu.pl*

**Streszczenie:** Jak dowodzą liczne badania na temat zanieczyszczenia światłem sztucznym i jego wpływem na obserwacje astronomiczne, środowisko naturalne, w tym florę i faunę oraz ludzi, ów problem stał się istotny i od pewnego czasu angażujący naukowców oraz opinię publiczną. W niniejszej pracy, na podstawie metody wywiadu, analizy i krytyki piśmiennictwa, a także doświadczeń własnych, przebadano, jakie są najbardziej aktywne stowarzyszenia, organizacje oraz ośrodki badawcze działające w zakresie zanieczyszczenia światłem sztucznym na świecie i w Polsce, które przyczyniają się do redukcji tego szkodliwego zjawiska.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem sztucznym, światło sztuczne w nocy, zewnętrzne oświetlenie sztuczne, badania naukowe, ochrona środowiska nocnego

## 1. Wstęp

We współczesnym świecie oświetlenie sztuczne przynosi wiele wymiernych korzyści, takich jak możliwość wydłużenia czasu pracy, a więc zwiększanie produkcji, szeroka oferta rekreacyjno-kulturalna, z jakiej można skorzystać po zmroku, czy też odbywanie podróży niezależnie od pory dnia. Jednak ta zwiększona elastyczność ma swoją cenę i negatywnie odbija się na środowisku naturalnym i jego użytkownikach.

Uniemożliwienie obserwacji astronomicznych (miejska tona świetlna), wzrost chorób cywilizacyjnych (przenikanie światła do wnętrza budynków mieszkalnych), wzrost wypadków komunikacyjnych (zjawisko olśnienia) czy zakłócanie naturalnych cykli życia flory i fauny to kilka istotnych konsekwencji zanieczyszczenia światłem sztucznym [1, 2, 3, 4]. Jak dowodzą badania w obszarze tej tematyki z ostatnich dwóch dekad, ten problem stał się istotny i od pewnego czasu angażujący również opinię publiczną [5, 6]. Pomimo rozwijającej się wiedzy w tym zakresie, zanieczyszczenie

światłem sztucznym dalej wzrasta średnio rocznie o więcej niż 2% [7] i obecnie aż 83% populacji ludzkiej na świecie w aglomeracjach miejskich mieszka w przestrzeniach dotkniętych tym zjawiskiem [8]. Celem pracy jest zbadanie, jakie są najbardziej aktywne stowarzyszenia, organizacje i ośrodki badawcze, których działalność związana jest z problematyką zanieczyszczenia światłem sztucznym, a szczególnie redukcji tego szkodliwego zjawiska na świecie i w Polsce, określenia metod ich pracy i zidentyfikowania potencjalnych środków naprawczych tego groźnego zjawiska.

## 2. Badania

### 2.1. Metody badawcze

Szeroko zakrojone badania podstawowe w okresie trzech miesięcy obejmowały dogłębną analizę i krytykę opublikowanego piśmiennictwa na temat zanieczyszczenia światłem sztucznym, takiego jak: monografie naukowe, artykuły naukowe, normy oświetleniowe, przepisy i raporty środowiskowe, dokumenty istniejących studiów przypadku czy doniesienia medialne znalezione w Internecie. Dodatkowo uwzględniono wywiady w języku angielskim z ekspertami, projektantami, naukowcami i działaczami zajmującymi się wymienionymi wcześniej zagadnieniami.

Ponadto autorka uwzględniła spostrzeżenia związane z jej wcześniejszymi badaniami aplikacyjnymi i doświadczeniami zawodowymi w dziedzinie iluminacji zewnętrznych czy też doświadczeniami zdobytymi w trakcie pełnienia roli członka komitetów technicznych międzynarodowych organizacji, takich jak: International Dark-Sky Association (IDA), Illuminating Engineering Society (IES) oraz trzech nowo powstałych komitetów w ramach działalności Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (fr. *Commission Internationale de l'Eclairage* – CIE).

### 2.2. Wyniki badań na świecie

#### 2.2.1. Stowarzyszenia

Przeprowadzone badania wykazały, że tylko w nielicznych krajach na świecie istnieje kilkanaście prężnie działających stowarzyszeń, które łączą w swoich gremiach badaczy i praktyków z wielu dziedzin i są traktowane jako rzetelne źródło wiedzy i partnerzy w dyskursie naukowym, społecznym oraz politycznym (tabela 1). Najprawdopodobniej ma to związek z istnieniem ośrodków badawczych czy polityką ochrony środowiska w danym państwie. W tym prawie 60% tych stowarzyszeń istnieje w państwach angielskojęzycznych. Najstarsze z nich powstało w Wielkiej Brytanii w 1926 roku.

Tabela 1. Przegląd stowarzyszeń zajmujących się tematyką zanieczyszczenia światłem sztucznym na świecie według roku ich założenia

Kraj	Stowarzyszenia	Rok utworzenia
Wielka Brytania	The Campaign to Protect Rural England (CPRE)	1926
Francja	The National Association for the Protection of the Night Sky and Environment (L'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes – ANPCEN)	1989
Wielka Brytania	The Commission for Dark Skies (CfDS), wcześniej znany jako The Campaign for Dark Skies	1989
Kanada	The Light–Pollution Abatement Committee (LPA Committee)	1991
Stany Zjednoczone	The New England Light Pollution Advisory Group (NELPAG)	1993
Włochy	CieloBuio – koordynowanie ochrony nocnego nieba	1997
Stany Zjednoczone	The International Dark-Sky Association (IDA)	1998
Słowenia	Dark-Sky Slovenia	2008
Szwajcaria	Dark Skies Advisory Group (DSAG)	2009
Australia	The Australasian Dark Sky Alliance (ADSA)	2019

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].

## 2.2.2. Organizacje wraz z komitetami technicznymi

Istnieją organizacje międzynarodowe, które również tworzą pisemne rekomendacje dla projektantów iluminacji zewnętrznych, przedstawicieli władz miast, zwykłych obywateli czy też agencji środowiskowych w stawianiu czoła obecnym wyzwaniom środowiskowym i aby zminimalizować zjawisko zanieczyszczenia światłem sztucznym (tabela 2). Wiele z tych rekomendacji opiera się na wynikach badań laboratoryjnych, a także na pomiarach w terenie.

Tabela 2. Przegląd organizacji wraz z ich komitetami technicznymi zajmującymi się tematyką zanieczyszczenia światłem sztucznym na świecie według kraju ich siedziby

Siedziba	Organizacja	Komitety Techniczny
Austria	International Commission on Illumination (CIE)	CIE TC4–58: Obtrusive Light from Colourful and Dynamic Lighting and its Limitation
		CIE TC4–61: Artificial Lighting and its Impact on the Natural Environment
		CIE TC2–9: Measurement of Obtrusive Light and Sky Glow

Tabela 2. (cd.)

	United Nations Office for Outer Space Affairs	The Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS), praca w Grupie Roboczej ds. Sztucznego Światła w Nocy (ALAN WG) nad raportem technicznym
Wielka Brytania	Society of Light and Lighting (SLL)	Brak specyficznego komitetu technicznego, praca w grupach tematycznych nad konkretną publikacją
	Institute of Lighting Professionals (ILP)	Brak specyficznego komitetu technicznego, praca w grupach tematycznych nad konkretną publikacją
Stany Zjednoczone	International Dark-Sky Association (IDA)	IDA Technical Committee
	Illuminating Engineering Society (IES)	Outdoor Environment Lighting Committee Outdoor Nighttime Environment Committee

Źródło: opracowanie własne.

1) Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE (fr. *Commission Internationale de l'Eclairage* – CIE) jest pozarządową organizacją z siedzibą w Austrii, powstałą w 1913 roku, mającą na celu współpracę i wymianę informacji w sprawach związanych z barwą, percepcją, fotobiologią i technologią światła naturalnego i sztucznego [10]. Członkami tej organizacji są komitety narodowe z czterdziestu krajów oraz ponad piętnastu członków indywidualnych z krajów lub regionów, w których nie zawiązały się komitety narodowe. Podstawowymi celami działalności CIE jest stworzenie forum do dyskusji międzynarodowej i wymiany informacji w sprawach dotyczących nauki, techniki i praktyki w zakresie światła i oświetlenia. Organizacja tworzy podstawowe wzorce i procedury pomiarów wielkości świetlnych, wydaje odpowiednie zalecenia, raporty i inne publikacje z zakresu światła i oświetlenia. CIE prowadzi prace merytoryczne w zakresie ośmiu wydziałów i w ponad stu pięćdziesięciu komitetach technicznych. Trzy komitety techniczne zajmują się zagadnieniami związanymi z zanieczyszczeniem światłem sztucznym:

1a) CIE TC4–58: *Obtrusive Light from Colourful and Dynamic Lighting and its Limitation* [11] zajmuje się stworzeniem wytycznych dotyczących wdrażania i poprawnego stosowania oświetlenia barwnego i dynamicznego w oświetleniu zewnętrznym, mających na celu ograniczenie światła niepożądanego w odniesieniu do obserwacji astronomicznych, ludzi i środowiska nocnego. Dodatkowo komitet ten opracowuje metryki światła niepożądanego (ang. *Obtrusive Light*) z barwnych i dynamicznych systemów oświetleniowych oraz proponuje odpowiednie metody ograniczania lub zapobiegania takiemu światłu;

- 1b) CIE TC4–61: Artificial Lighting and its Impact on the Natural Environment zajmuje się stworzeniem wytycznych dotyczących sposobów zminimalizowania wpływu światła sztucznego na środowisko naturalne, w tym wpływu na florę i faunę, za pomocą sformułowania zaleceń dotyczących poziomów natężenia oświetlenia, rozkładów spektralnych i innych szczególnych zagadnień dotyczących organizmów żywych, a także ich określonych siedlisk [12];
- 1c) CIE TC2–9: Measurement of Obtrusive Light and Sky Glow zajmuje się pomiarami światła niepożądanego (ang. *Obtrusive Light*) i miejskiej łuny świetlnej (ang. *Sky glow*). Głównym celem jest dostarczenie wytycznych i dobrych praktyk dotyczących metod pomiaru niepożądanego sztucznego światła i łuny świetlnej oraz odpowiedniej specyfikacji przyrządów pomiarowych niezbędnych do walidacji kryteriów oceny jego wpływu na środowisko, w tym oszacowania błędu pomiaru. Zaproponowane wytyczne i przykłady wraz z wiarygodnymi i identyfikowalnymi technikami będzie można wykorzystywać jako wspólną podstawę różnych dyscyplin, które zajmują się pomiarami światła sztucznego w środowisku naturalnym i zurbanizowanym, oraz oceną jego oddziaływania na ekosystem [13].

Również opublikowane w 1987 oraz 2017 roku wytyczne CIE 126:1987 i CIE 150:2017 wymagają rewizji ze względu zarówno na brak łatwo aplikowanej metodologii pomiarów i narzędzi związanych z pojawieniem się nowych technologii LED, jak i na prace badawcze wskazujące, że dotychczas zaproponowane dopuszczalne poziomy zewnętrznego oświetlenia sztucznego są zbyt wysokie, nie uwzględniają rekomendacji w kwestii spektrum światła i przez to również powodują wzrost zanieczyszczenia światłem sztucznym. The CIE 126:1987 *Guidelines for Minimizing Sky Glow* (CIE 126:1987 Wytyczne minimalizacji miejskiej łuny świetlnej) zawierają ogólne wskazówki dla projektantów oświetlenia i decydentów dotyczące redukcji miejskiej łuny świetlnej, w tym omawiają teoretyczne aspekty oraz zalecenia dotyczące zalecanych wartości granicznych dla instalacji oświetleniowych w pobliżu obserwatoriów astronomicznych, niezbędnych do prowadzenia obserwacji astronomicznych [14]. CIE 150:2017 *Guide on the Limitation of the Effects of Obstructive Light from Outdoor Lighting Installations* (CIE 150:2017 Wytyczne do ograniczania wpływu światła natrętnego z zewnętrznych instalacji oświetleniowych) [15] dotyczą zaleceń do przeprowadzenia oceny wpływu oświetlenia zewnętrznego na środowisko oraz zawierają zalecane wartości graniczne dla odpowiednich parametrów oświetlenia, aby ograniczyć jego niepożądane efekty.

Celem tego opracowania jest pomoc w sformułowaniu wytycznych dotyczących oceny wpływu oświetlenia zewnętrznego na środowisko oraz podanie zalecanych wartości granicznych dla odpowiednich parametrów oświetlenia, aby przyhamować niepożądane efekty oświetlenia zewnętrznego w dopuszczalnych granicach. Zaproponowano pięć oświetleniowych stref środowiskowych (E0–E4) określonych przez ich lokalizację i użytkowanie, a także uwzględniających różne



parametry oświetleniowe. Ten dokument określa również dopuszczalne poziomy penetrowania światłem sztucznym przez okna na fasadzie budynku, dopuszczalną maksymalną średnią luminancję fasady, a także ustala poziomy miejskiej tony świetlnej.

CIE w roku 2020 zorganizowało również dwudniowe warsztaty dotyczące metod obliczeniowych i pomiarów światła niepożądanego (ang. *CIE workshop on the calculation and measurement of obtrusive lighting* [16]). Warsztaty poruszały aspekty takie, jak: metody i narzędzia do modelowania i obliczeń, oprzyrządowanie, metody pomiaru i jego oceny, aspekty czasowe i spektralne, wpływ światła sztucznego na środowisko, w tym ludzi, florę, faunę, a także metody projektowania oświetlenia zewnętrznego i najlepsze praktyki projektowe.

2) Society of Light and Lighting (SLL) działa jako profesjonalny organ ds. oświetlenia w Wielkiej Brytanii, reprezentuje interesy osób zaangażowanych w sztukę, naukę i inżynierię światła oraz oświetlenia w ich najszerzej definicji; ma ponad 2000 członków w Wielkiej Brytanii i na całym świecie [17]. Stowarzyszenie zostało pierwotnie założone jako Illuminating Engineering Society w 1909 roku, później stając się oddziałem Chartered Institute of Building Services Engineering (CIB-SE). Dopiero od niedawna stowarzyszenie to zajmuje się tematyką zanieczyszczania światłem sztucznym, tworząc wytyczne dla swoich członków, mające pomóc zminimalizować to zjawisko:

– Lighting Guide (LG) 21: *Protecting the Nighttime Environment* – to opublikowane w 2021 roku wytyczne, mające na celu ochronę środowiska nocnego oraz określenie konsekwencji zanieczyszczenia światłem sztucznym przez postawienie właściwych pytań, które należy zadać podczas projektowania systemów oświetlenia zewnętrznego. Dodatkowo dokument uwzględnia powszechnie zastosowania, w tym oświetlenie elewacji, budynków zabytkowych, oświetlenie obiektów sportowych i oświetlenie bezpieczeństwa publicznego. Przedstawia również potencjalne środki potrzebne do redukcji tego zjawiska [18], jednak są one niekompletne i zbyt mało szczegółowe.

W maju 2022 roku SLL wraz z grupą badawczą ILLUME z Politechniki Gdańskiej zorganizowała inauguracyjną międzynarodową konferencję pt. „Responsible Outdoor Lighting at Night” (ROLAN 2022) [19].

ROLAN 2022 to dwudniowa konferencja online oraz panel dyskusyjny na żywo na temat odpowiedniego oświetlenia zewnętrznego, który łączy badania naukowe z praktyką. Trzydziestu jeden renomowanych prelegentów z krajów, takich jak: Australia, Belgia, Francja, Niemcy, Wielka Brytania, Finlandia, Francja, Włochy, Polska, Słowenia, Hiszpania, Szwecja i Stany Zjednoczone Ameryki (USA), z uwzględnieniem swojej dziedziny (projektowanie oświetlenia, nauki o środowisku, biologia, astronomia, nauki medyczne i aspekty prawne) przedstawiło wykłady związane z badaniami i praktyką w czterech następujących sekcjach:

- (1) Utrata ciemnej nocy,
- (2) Najlepsze praktyki oświetleniowe przyczyniające się do zmniejszenia zanieczyszczenia światłem sztucznym,

- (3) Aspekty prawne dotyczące zanieczyszczenia światłem,
- (4) Wpływ światła sztucznego na środowisko i człowieka.

Wydarzenie było wyjątkową okazją dla praktyków, specjalistów w dziedzinie oświetlenia (projektantów i inżynierów), architektów, urbanistów, projektantów krajobrazu, przemysłu oświetleniowego (producentów), władz lokalnych, aktywistów, ekologów i badaczy, aby być na bieżąco z najnowszymi badaniami naukowymi i praktykami zawodowymi związanymi z odpowiednim oświetleniem i minimalizacją zanieczyszczenia światłem sztucznym w środowisku naturalnym i zurbanizowanym.

- 3) The Institution of Lighting Professionals (ILP) to brytyjskie i irlandzkie profesjonalne stowarzyszenie inżynierów oświetlenia założone w 1924 roku jako Association of Public Lighting Engineers, później znane jako Institution of Lighting Engineers, które w 2010 roku przyjęło swoją obecną nazwę. Jest licencjonowanym zespołem Rady Inżynierów w Wielkiej Brytanii do oceny kandydatów do wpisu do jej rejestru zawodowych inżynierów [20]. Jako wpływowa organizacja zawodowa konsultuje dla rządu w szerokim zakresie kwestie ustawodawstwa i przepisów w środowisku zbudowanym (struktura i infrastruktura tworzona przez człowieka) [21]. Organ ten dąży do tego, aby proponowane działania były zarówno skuteczne, jak i wykonalne, poprzez zasiadanie w komisjach oraz komentowanie projektów aktów prawnych, raportów i udział w konsultacjach. Liczy on około 2000 indywidualnych członków i 120 członków firm lub organizacji. Jego głównym celem jest bycie stowarzyszeniem dla inżynierów w przemyśle oświetleniowym i pokrewnych dziedzinach, ale i jednostką techniczną czy edukacyjną do publicznego rozpowszechniania informacji technicznych i ustanawiania standardów kwalifikacji zawodowych.

ILP opracowało kilka profesjonalnych wytycznych dotyczących zanieczyszczenia światłem sztucznym:

- GN01–21 *Guidance Note 1 for the Reduction of Obtrusive Light 2021* – wytyczne dotyczą międzynarodowych zasad odnoszących się do światła niepożądanego w dokumencie CIE 150:2017. Dostarczają one również przydatnej wiedzy na temat wpływu źródła światła na zdolność widzenia nocnego nieba, z uwzględnieniem różnych kątów emitowanego światła oraz jego bezpośredniego wpływu na miejską tunę świetlną i oślnienie [22].
- PLG04 *Guidance on Undertaking Environmental Lighting Impact Assessments* (Wytyczne Dotyczące Przeprowadzania Oceny Oddziaływania Oświetlenia na Środowisko) – dokument przedstawia dobre praktyki w projektowaniu oświetlenia i dostarcza praktycznych wskazówek dotyczących produkcji i oceny wpływu oświetlenia w nowych rozwiązaniach [23].
- PLG05 *The Brightness of Illuminated Advertisements* (Jasność reklam świetlnych) zapewnia wskazówki dla wszystkich osób zajmujących się reklamami świetlnymi na zewnątrz z uwzględnieniem zmian zarówno w technologii, jak i w ramach prawnych oraz praktyce oświetleniowej. W szczególności

dokument omawia zastosowanie ekranów multimedialnych i fasad, zapewniając jasne wskazówki dotyczące planowania, oceny i obsługi wszelkich form reklamy świetlnej [24].

- GN08–18 *Guidance Note 8 Bats and Artificial Lighting* (Wytyczna nr 8 Nietoperze i sztuczne oświetlenie) porusza temat negatywnego wpływu oświetlenia sztucznego na nietoperze, ale także dotyczy potencjalnych rozwiązań pozwalających uniknąć i ograniczyć ewentualne szkody [25].

4) International Dark-Sky Association (IDA) – organizacja założona w USA w 1988 roku, jest jedną z najbardziej rozpoznawalnych instytucji tego typu na świecie, działającą na rzecz zachowania i ochrony nocnego środowiska i dziedzictwa ciemnego nieba poprzez podnoszenie świadomości na temat znaczenia ciemności w nocy oraz edukacji i wytycznych na temat wysokiej jakości oświetlenia zewnętrznego [26].

Obecnie na całym świecie istnieje 59 oficjalnych oddziałów IDA, w tym ponad 20 oddziałów międzynarodowych reprezentujących pięć kontynentów. W Polsce jak do tej pory nie ma jej oficjalnego oddziału. Globalna sieć IDA z ponad 20 tysiącami członków i sympatyków opowiada się za edukacją decydentów w gminach i społecznościach lokalnych w zakresie korzyści płynących z ochrony nocnego nieba. Pomaga również w opracowywaniu i tworzeniu propozycji rozporządzeń oświetleniowych potrzebnych do zminimalizowania zanieczyszczenia światłem. W ramach organizacji IDA powstał Komitet Techniczny IDA, który doradza rządowi w pojawiających się kwestiach praktyk oświetlenia zewnętrznego, które mają wpływ na zdrowie ludzi oraz przetrwanie flory i fauny, a także pracuje nad stworzeniem odpowiednich polityk i rekomendacji w celu złagodzenia tych problemów. Rekomendacje powstałe w ramach komitetu technicznego to:

- *Criteria for Community Friendly Outdoor Sports Lighting v1.0* (Kryteria przyjaznego dla społeczności oświetlenia sportowego na świeżym powietrzu), opublikowane w 2018 roku, pomagają ulepszyć projektowanie oświetlenia obiektów sportowych na świeżym powietrzu w celu zminimalizowania jego poświaty, przenikania światła i olśnienia okolicznych obszarów mieszkalnych, a także miejsca, w których lokalna ekologia musi być chroniona [27].
- *Guidance for Electronic Message Centers – EMCs* (Wytyczne dotyczące centrów wiadomości elektronicznych – EMC) – zalecenia opublikowane w 2019 roku określają minimalne wymagania i zestaw najlepszych praktyk zarządzania w celu zmniejszenia negatywnego wpływu oświetlonych szyldów i reklam w środowisku zabudowanym [28].

Ponadto w roku 2001 IDA stworzyła Program Ochrony Miejsc Ciemnego Nieba (ang. *The International Dark-Sky Association's Dark-Sky Places*) w celu zachęcania społeczności do zachowania i ochrony ciemnych miejsc w parkach i obszarach chronionych na całym świecie przez prowadzenie odpowiedzialnej polityki oświetleniowej i edukacji [29]. W uznaniu wysiłków związanych z zapewnieniem ciemnego nieba IDA przyznaje wyróżnienia w pięciu kategoriach:

- (1) Międzynarodowe Społeczności Ciemnego Nieba – ang. *International Dark-Sky Communities*;
  - (2) Międzynarodowe Parki Ciemnego Nieba – ang. *International Dark-Sky Parks*;
  - (3) Międzynarodowe Rezerваты Ciemnego Nieba – ang. *International Dark-Sky Reserves*;
  - (4) Międzynarodowe Azyle Ciemnego Nieba – ang. *International Dark-Sky Sanctuaries*;
  - (5) Miejskie Obszary Nocnego Nieba – ang. *Urban Night-Sky Places*.
- 5) Illuminating Engineering Society (IES) założona w 1906 roku w Stanach Zjednoczonych to najbardziej znana i najstarsza organizacja związana z oświetleniem – przypisuje się jej szereg znaczących publikacji na temat oświetlenia, organizacje odczytów, konferencji i szkoleń. Misją IES jest poprawa oświetlenia środowiska poprzez zgromadzenie osób mających wiedzę o oświetleniu i przełożenie tej wiedzy na działania przynoszące korzyści społeczeństwu [30]. Złożona jest z 46 komitetów technicznych, w tym dwóch zajmujących się zagadnieniem zanieczyszczenia światłem sztucznym:
- 5a) Outdoor Environmental Lighting Committee (OELC) opracowuje najlepsze praktyki dotyczące oświetlenia zewnętrznego i minimalizowania negatywnego wpływu światła elektrycznego w nocy na środowisko nocne. Zakres działalności obejmuje zagadnienia oświetleniowe, które są przede wszystkim związane z oświetleniem zewnętrznym i mogą mieć negatywny wpływ na środowisko. Ten komitet działa w połączeniu z innymi komitetami IES, które również tworzą zalecenia dotyczące oświetlenia dla środowiska zewnętrznego, takiego jak jezdnia, ulica, chodniki czy pasaże, lotniska i przestrzeń publiczna, aby zapewnić jednolitość zaleceń oświetleniowych [31].
  - 5b) Outdoor Nighttime Environment Committee (ONEC) – komitet, powstały w 2020 roku, zajmuje się opracowaniem i utrzymaniem standardów IES obejmujących wizualne aspekty oświetlenia zewnętrznego, takie jak widzenie w nocy i ośnienie, ciągów pieszych, w tym elementów środowiska niebędących drogami (np. chodniki, architektura krajobrazu, sztuka, pomniki i elewacje budynków) oraz ustalaniem wytycznych oświetleniowych dla nocnych czynników środowiskowych, takich jak miejska łuna świetlna i ochrona przyrody [32].

IES jest współodpowiedzialna za stworzenie dwóch standardów amerykańskich wraz z American National Standard Institut (ANSI), które poruszają tematykę zanieczyszczenia światłem sztucznym:

- ANSI/IES LP-11-20 Environmental Considerations for Outdoor Lighting) (ANSI/IES LP-11-20 Względy środowiskowe dotyczące oświetlenia zewnętrznego) [33] – w tym dokumencie przedstawiono kwestie środowiskowe oświetlenia zewnętrznego, zwłaszcza w odniesieniu do ośnienia, miejskiej łuny świetlnej i światła penetrującego oraz wpływu światła elektrycznego w nocy na florę i faunę. Ponadto, zawarto informacje o tym, jak stosować

w praktyce środowiskowe strefy oświetleniowe i jak korzystać z dokumentu Joint IDA–IES Model Lighting Ordinance (MLO) jako podstawy do rozporządzenia w sprawie oświetlenia zewnętrznego. Na koniec w tym dokumencie omówiono projektowanie społecznościowe i przedstawiono konkretne zalecenia dotyczące oświetlenia obszarów zewnętrznych.

- ANSI/IES RP–39–19 *Off–Roadway Sign Luminance* (ANSI/IES RP–39–19 Jasność terenowych znaków drogowych) zawiera zalecenia obejmujące ograniczenia dotyczące maksymalnej luminancji znaku; zalecenia te zawierają jedynie wskazówki dotyczące oświetlenia znaków, które znajdują się poza pasem jezdni – innymi słowy, wszystkich znaków niepodlegających jurysdykcji federalnej, stanowej, prowincjonalnej lub lokalnej – i obejmują zarówno lokalizację, jak i tereny oświetlone wewnątrz i zewnątrz oraz znaki elektroniczne [34].

### 2.2.3. Ośrodki, badania i publikacje naukowe na świecie

Poza wymienioną działalnością stowarzyszeń, organizacji i komitetów technicznych na świecie prowadzone są badania naukowe w tematyce zanieczyszczenia światłem sztucznym w kilkunastu ośrodkach naukowych: w Australii, Austrii, Belgii, Francji, Grecji, Hiszpanii, Wielkiej Brytanii, Kanadzie, Niemczech, Polsce, Słowenii, Szwecji, na Węgrzech, we Włoszech i w Stanach Zjednoczonych (tabela 3). Dotyczą one takich zagadnień, jak: pomiary i modelowanie tego zjawiska, zagadnienia prawne i regulacje, wpływ na biologię, ekologię i zdrowie organizmów żywych czy wpływ zastosowanych technologii świetlnych i designu. Przedstawiciele tych ośrodków spotykają się na międzynarodowej konferencji „Artificial Light at Night (ALAN)”, która odbywa się w różnych miejscach na świecie, aby podzielić się swoją najnowszą wiedzą zdobytą podczas badań. Do tej pory odbyło się siedem edycji tego wydarzenia. W Niemczech (2013), Wielkiej Brytanii (2014), Kanadzie (2015), Rumunii (2016), Stanach Zjednoczonych (2017, 2018), Hiszpanii w formie online (2020).

Potrzebę wspólnego działania w zakresie zanieczyszczenia światłem sztucznym dostrzegły również Biuro Narodów Zjednoczonych ds. Przestrzeni Kosmicznej (ang. *United Nations Office for Outer Space Affairs* (UNOOSA) [35], Międzynarodowa Unia Astronomiczna (ang. *International Astronomical Union*) [36] oraz rząd Hiszpanii, czego efektem były zorganizowane w roku 2020 międzynarodowe warsztaty specjalistów w tej dziedzinie po tytule „Ciemne i Ciche Niebo”, a w roku 2021 konferencja naukowa pt. „Konferencja Ciemne i Ciche Niebo II” (ang. „*Dark and Quiet Skies II Conference*”).

Konferencja i jej raporty skupiły się na trzech kategoriach sztucznych zakłóceń, które negatywnie wpływają na obserwacje astronomiczne: (1) oświetlenie miejskie lub sztuczne światło w nocy; (2) optyczne ślady satelitów na niskich orbitach okołozemskich; (3) transmisja radiowa przez nadajniki naziemne i kosmiczne, która wpływa na radioastronomię [37].

Na świecie, badania i publikacje naukowe z zagadnień zanieczyszczenia światłem sztucznym skupiają się na bardzo specjalistycznych, często wąskich tematach badawczych w danej dziedzinie lub też rozpatrują dany temat tylko z jednej perspektywy badawczej. Znanych jest kilka interdyscyplinarnych prac biologów czy epidemiologów wraz ze specjalistami z zakresu teledetekcji [38, 39], czy też biologów i prawników [40], jednak brak jest wśród tej grupy współpracy badaczy z dziedziny oświetlenia zewnętrznego. Dlatego na uwagę zasługują niedawno opublikowane dwie prace naukowe, powstałe w ramach interdyscyplinarnej współpracy badawczej między biologami i badaczami oświetlenia zewnętrznego.

Pierwszy artykuł dotyczy ram dla transdyscyplinarnych badań nad oświetleniem miejskim i procesem współpracy z profesjonalistami z branży oświetleniowej [41]. Drugi artykuł natomiast jest opracowaniem przeglądowym obejmującym 1417 badań w celu zdefiniowania istotnych parametrów środowiskowych dla oświetlenia miejskiego w kontekście skutków ekspozycji na różne właściwości fizyczne sztucznych źródeł światła na różne grupy organizmów, w tym rośliny, stawonogi, ryby, płazy, gady, ptaki i ssaki inne niż człowiek (w tym nietoperze, naczelnie, gryzonie i torbacze) [42]. Jak dotąd są to pierwsze prace naukowe na świecie opublikowane z takiej perspektywy.

Tabela 3. Znaczące ośrodki naukowe zajmujące się tematyką zanieczyszczenia światłem sztucznym na świecie i ich przedstawiciele\*

Kraj	Ośrodek naukowy	Osoba odpowiedzialna
Australia	Pendoley Environmental	dr Kellie Pendoley
Austria	University of Vienna	dr Stefan Wallner
Belgia	University of Ghent	Yana Yakushina
Francja	National Metrology and Testing Laboratory Paris	dr Romain Chasseigne
Grecja	National Technical University of Athens, Lighting Laboratory	dr Constantinos A. Bouroussis
	School of Applied Arts, Hellenic Open University	prof. dr. Lambros T. Doulos
Hiszpania	Parc Astronomic Montsec	dr Salvador J. Ribas
	Complutense University of Madrid	dr Alejandro Sanchez de Miguel
Irlandia	Trinity College Dublin	dr Brian Espey
Kanada	Cégep de Sherbrooke	prof. Martin Aubé
Korea	Kyung Hee University,	dr Gon Kim
Niemcy	Fachgruppe Dark Sky der Vereinigung der Sternfreunde	dr Andreas Hänel
	Technical University Berlin	dr Dietrich Henckel

Tabela 3. (cd.)

	Leibniz–Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries	dr hab. Franz Hölker dr Andreas Jechow
	GFZ German Research Centre for Geosciences	dr Christopher Kyba dr Nona Schulte–Römer
	University Heidelberg	Dominik Huggins
Portugalia	Polytechnic Institut of Porto	dr Raul Cerveira Lima
Słowacja	Slovak Academy of Sciences / Comenius University	dr Miroslav Kocifaj
Węgry	Eszterházy Károly University	prof. dr hab. Zoltán Kolláth
Włochy	Light Pollution Science and Technology Institute	dr Pierantonio Cinzano Fabio Falchi
Wielka Brytania	Leicester DeMontfort Law School	dr Martin Morgan–Taylor
	University of Exeter	prof. dr Kevin J. Gaston
Szwecja	Halmstad University	dr Annika Jägerbrand
Stany Zjednoczone	Smith College	dr James Lowenthal
	Adlers Planetarium	dr Ken Walczak
	University of Arizona	dr Richard Green
	University of Hawaii	dr Richard Wainscoat
	University of California Los Angeles	dr Travis Longcore
	Colorado School of Mines	dr Christopher D. Elvidge

\* Dane dotyczące Polski zaprezentowano w tabeli nr 4.

Źródło: opracowanie własne.

Sieć naukowa ES1204 – *Loss of the Night Network* (LoNNe) [43, 44] powstała w latach 2012–2016 jako pierwsza międzynarodowa sieć naukowa finansowana ze środków European Cooperation in Science and Technology (COST) z udziałem 18 partnerów z Europy i poza niej, miała na celu poszerzenie wiedzy na temat wielorakich skutków wzrostu zanieczyszczenia światłem sztucznym atmosfery ziemskiej na świecie. Ze względu na fakt, że potencjał tworzenia sieci w celu zwiększenia mobilności między różnymi podmiotami z dziedziny nauki, opieki zdrowotnej, władz publicznych i przemysłu był ograniczony, dodatkowym celem LoNNe była współpraca tych podmiotów, wymiana wiedzy oraz umiejętności. Po zakończeniu programu członkowie tej sieci w dalszym ciągu są w stałym kontakcie i wymieniają się w zamkniętej grupie na forum internetowym swoimi badaniami oraz wspólnie odpowiadają na zadawane pytania jej członków.

Grant Horizon 2020: STARS4ALL [45] A Collective Awareness Platform for Promoting Dark Skies in Europe – to kolejna inicjatywa sponsorowana przez Unię w ramach programu Horyzont 2020, w okresie od 2016 do 2018 roku, mająca na celu wspieranie badań w Europie i stworzenie wspólnej platformy świadomości promującej ciemne niebo. Niektóre z osiągnięć obejmowały stworzenie aplikacji Dark Sky Meter, która mierzy jasność nieba i udostępnia ją naukowcom na całym świecie, a także fotometru TESS–W przeznaczonego do pomiaru i ciągłego monitorowania jasności nocnego nieba pod kątem zanieczyszczenia światłem atmosfery ziemskiej.

Globe at Night to międzynarodowa sieć pomiaru jasności nieba GaN–MN. (ang. *Globe at Night – Sky Brightness Monitoring Network*) [46].

Pomiary wykonywane są za pomocą specjalistycznego czujnika SQM–LE firmy Unihedron, przeznaczonego do długoterminowego monitorowania w czasie rzeczywistym. Cała sieć liczy 64 czujniki zlokalizowane w 19 krajach na świecie. Politechnika Gdańska jest, jak dotąd, pierwszym zarejestrowanym członkiem tego programu z Polski [47].

## 2.3. Wyniki badań w Polsce

### 2.3.1. Stowarzyszenia

Na uwagę zasługuje fakt, że w Polsce już od roku 1994 aktywnie działa Stowarzyszenie POLARIS – OPP – instytucja pozarządowa o statusie organizacji pożytku publicznego [48], która zajmuje się działalnością edukacyjno-popularyzatorską w zakresie astronomii, pokrewnych nauk ścisłych oraz zanieczyszczenia światłem sztucznym. Z inicjatywy tego stowarzyszenia powstał Program Ciemne Niebo, który przyznaje cztery kategorie związane z ochroną naturalnej ciemności nocy i gwieździstego nieba w Polsce, a są to: (1) Rezerваты Ciemnego Nieba; (2) Parki Ciemnego Nieba (3) Obszary Ciemnego Nieba, (4) Inne Miejsca [49].

### 2.3.2. Ośrodki, badania i publikacje naukowe

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że badania dotyczące zanieczyszczenia światłem sztucznym są tematem w Polsce stosunkowo nowym. Działalność naukowa dotycząca tej problematyki skupiona jest głównie wokół kilkunastu ośrodków naukowych w Białymstoku, Gdańsku, Krakowie, Łodzi, Warszawie, Wrocławiu i Toruniu oraz ich badaczy (tabela 4). Warto nadmienić, że w ramach Centrum Badawczego EcoTech na Politechnice Gdańskiej utworzono prężnie działającą interdyscyplinarną grupę badawczą ILLUME, która zajmuje się tą wąską specjalnością. Członkami grupy są projektanci oświetlenia sztucznego, architekci, urbaniści, biolodzy, prawnicy, geodeci, specjaliści z zakresu fotogrametrii i teledetekcji, którzy posiadają umiejętności praktyczne i wiedzę badawczą w zakresie tych interdyscyplinarnych zagadnień [50].

Natomiast prace badawcze w formie artykułów naukowych czy przeglądowych, informujących o stanie wiedzy w Polsce również z zakresu zanieczyszczenia światłem sztucznym publikowane są w kwartalniku „Kosmos”, najstarszym polskim czasopiśmie naukowych wydawanym przez Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika [51] czy w miesięczniku „Aura – Ochrona Środowiska” [52]. Na uwagę zasługuje również wydanie specjalne „Light Pollution”, międzynarodowego czasopisma naukowego “The International Journal of Environmental Research and Public Health” (IJERPH), w którym redaktorami gościnnymi byli badacze z dwóch ośrodków w Polsce [53].



Od roku 2013 cyklicznie odbywa się również Ogólnopolska Konferencja nt. Zanieczyszczenia Światłem (OKZŚ) jako interdyscyplinarny zjazd naukowy. Do tej pory odbyło się sześć edycji tego wydarzenia: w Warszawie (2013) [54], Wrocławiu (2014) [55], Krakowie (2015) [56], Rzeszowie (2016) [57], Warszawie (2017) [58], Łodzi (2021) [59]. Jej celem jest przybliżenie problemu zanieczyszczenia światłem sztucznym, który w Polsce jest jeszcze mało znany. Podczas konferencji poruszane są tematy związane z problemami środowiskowymi, astronomicznymi i ekonomicznymi zanieczyszczenia światłem oraz zagadnieniami dotyczącymi łagodzenia tych skutków przez odpowiednie rozwiązania w technice oświetleniowej, architekturze i urbanistyce. Do uczestnictwa w tych sympozjach zapraszane są osoby związane z ochroną środowiska, astronomią, medycyną, techniką oświetleniową, architekturą, urbanistyką, kwestiami prawnymi, a także przedstawiciele samorządów terytorialnych czy organizacji pozarządowych, działających na rzecz ochrony nocnego środowiska.

Tabela 4. Ośrodki naukowe zajmujące się tematyką zanieczyszczenia światłem sztucznym w Polsce\*

Miasto	Ośrodek naukowy
Białystok	Politechnika Białostocka
Gdańsk	Politechnika Gdańska – grupa ILLUME w ramach Centrum Badawczego „EkoTech”
	Uniwersytet Gdański – Wydział Prawa i Administracji
Łódź	Politechnika Łódzka
Toruń	Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Wrocław	Uniwersytet Wrocławski
Warszawa	Ogród Botaniczny, Wydział Biologii, Uniwersytet Warszawski
	Politechnika Warszawska
Kraków	Politechnika Krakowska
	Uniwersytet Rolniczy

\* Na wniosek jednego z recenzentów pracy nazwiska osób zajmujących się zanieczyszczeniem światłem sztucznym w Polsce zostały usunięte.

Źródło: opracowanie własne.

### 3. Podsumowanie

Pierwszymi, którzy zauważyli potrzebę ochrony nocnego nieba i negatywny wpływ, jaki może wyrządzić zewnętrzne oświetlenie sztuczne, byli astronomowie, nieco później ekolodzy, biolodzy czy epidemiolodzy, a niedawno dopiero projektanci iluminacji zewnętrznych i nieliczni producenci opraw oświetleniowych, którzy zrozumieli, że najważniejsza nie jest kwestia estetyki czy wydajności energetycznej i świetlnej, a raczej komu ma ono służyć, kiedy i gdzie ma być stosowana.

Antropogeniczne zanieczyszczenie światłem sztucznym to problem złożony ze względu na fakt, że zewnętrzne oświetlenie ma wpływ na środowisko naturalne, bioróżnorodność, ekosystemy, zdrowie ludzkie i społeczeństwo. Wielokrotnie brak

jest stosownych stowarzyszeń, organizacji czy ośrodków badawczych, a istniejące metody przeciwdziałania temu zagrożeniu są często fragmentaryczne na poziomie lokalnym lub krajowym. Natomiast zanieczyszczenie światłem sztucznym może być sprawą regionalną lub wręcz globalną, ponieważ może się ono przemieszczać nawet do kilkuset kilometrów od swojego źródła i tam wyrządzać szkody.

Pomimo postulatów o potrzebie współpracy głoszonych przez różnych badaczy [60], zarówno na świecie, jak i w Polsce, zauważalny jest brak interdyscyplinarnej współpracy badawczej, która nie tylko konsekwentnie pozwoliłaby zidentyfikować istotne problemy i tematy badawcze, ale także wskazałaby praktyczne rozwiązania. Takie działania w zakresie iluminacji oraz jej aspektów prawnych poprawiłyby istniejącą i przyszłą sytuację, tworząc skuteczne programy minimalizujące wpływ zanieczyszczenia światłem sztucznym na ludzi, florę i faunę. Problematyka ta jest szczególnie aktualna obecnie, kiedy uwarunkowania wynikające z ochrony środowiska i potrzeb zrównoważonego rozwoju są szeroko dyskutowane w kontekście zmian klimatycznych oraz rozwoju polityki środowiskowej i zdrowotnej, gdzie zaangażowanie badaczy, a także ekspertów z różnych dziedzin oraz transfer wiedzy stały się koniecznością. Ponadto na podstawie przeprowadzonych analiz widoczna jest bardzo duża dysproporcja w liczbie badań wykonanych na świecie w stosunku do badań w Polsce, co może być spowodowane wysokością dotacji przeznaczonych na naukę. Aby tworzyć innowacyjne badania na poziomie światowym i potem je opublikować, potrzebne są odpowiednie środki finansowe, których w Polsce, jak dotąd, jest zbyt mało.

Niestety wciąż tylko niewielka liczba polskich badaczy, zajmujących się tematem zanieczyszczenia światłem sztucznym, udostępnia wyniki swoich badań naukowych w języku angielskim w publikacjach w czasopismach naukowych z listy JCR [61, 62, 63, 64]. Z tego powodu wyniki innych, ciekawych polskich badań nie mogą być twórczo wykorzystywane w obiegu informacji międzynarodowej przez badaczy na świecie.

Odnośnie obecności rodzimych naukowców w międzynarodowych komitetach technicznych, wymienionych w tabeli 2, należy odnotować, że ich członkami są głównie badacze z Politechniki Gdańskiej [65, 66, 67, 68].

Aby wesprzeć starania Stowarzyszenia POLARIS – OPP przeciwdziałające zanieczyszczeniu światłem sztucznym, ciekawym rozwiązaniem mogłoby być powołanie polskiego oddziału International Dark-Sky Association (IDA), jako kolejnego narzędzia partycypacji obywatelskiej i skorzystanie z wieloletniej wiedzy i zasobów tej międzynarodowej organizacji. Oddział IDA reprezentowałoby interesy osób związanych z omawianą problematyką w tym nie tylko aktywistów czy badaczy z różnych dziedzin, ale także praktyków, promujących interdyscyplinarną współpracę w kwestiach takich jak: ochrona środowiska i przyrody, planowanie przestrzenne, polityka miejska, zdrowie czy prawo budowlane itp. Oddziały IDA działają już na świecie w wielu krajach i prężnie współpracują z innymi lokalnymi organizacjami pozarządowymi zajmującymi się również tym istotnym zagadnieniem [69]. Takie podejście stworzyłoby szanse zminimalizowania tego cywilizacyjnego zagrożenia w sposób kompleksowy.

## Literatura

- [1] Bará S., *Anthropogenic disruption of the night sky darkness in urban and rural areas*, Royal Society Open Science, 2016, 3, art. 160541.
- [2] Longcore T., Rich C., *Ecological light pollution*, Frontiers in Ecology and The Environment, 2004, 2, s. 191–198.
- [3] Kyba C.C.M., Kuester T., de Miguel A.J., Baugh K., Jechow A., Franz Hölker F., Bennie J., Elvidge C.D., Gaston K.J., Guanter L., *Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent*, Science Advances, 2017, 3, s. 11.
- [4] Szlachetko K., Zielińska-Dąbkowska K.M., *O (bez)skuteczności prawa polskiego wobec antropogenicznych zanieczyszczeń światłem sztucznym (ang. man-made light pollution)*, Przegląd Prawa Publicznego, 2021, 5, s. 22–39.
- [5] Watts, J., *Treat artificial light like other forms of pollution, say scientists*, The Guardian, publ. 2.11.2020, <https://www.theguardian.com/environment/2020/nov/02/treat-artificial-light-form-pollution-environment> (dostęp: 05.02.2022).
- [6] St. Fleur N., *Light Pollution Masks the Milky Way for a Third of the World's Population*, The New York Times, publ. 10.06.2016, <https://www.nytimes.com/2016/06/11/science/milky-way-light-pollution-dark-skies.html> (dostęp: 05.02.2022).
- [7] Kyba C.C.M., Kuester T., de Miguel A.S, Baugh K., Jechow A., Hölker F., Bennie J., Elvidge C.D., Gaston K.J., Guanter L., *Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent*, Science Advances, 2017, 3, e1701528.
- [8] Drake N., *Our nights are getting brighter, and Earth is paying the price*, National Geographic, publ. 3.04.2019, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/nights-are-getting-brighter-earth-paying-the-price-light-pollution-dark-skies> (dostęp: 05.02.2022).
- [9] Zielinska-Dabkowska K.M., Xavia K., Bobkowska K., *Assessment of Citizens' Actions against Light Pollution with Guidelines for Future Initiatives*, Sustainability, 2020, 12, 12, s. 4997.
- [10] International Commission on Illumination, About the CIE, <https://cie.co.at/node/2> (dostęp: 05.02.2022).
- [11] International Commission on Illumination, *4-58: Obtrusive light from colourful and dynamic lighting and its limitation*, <https://cie.co.at/technicalcommittees/obtrusive-light-colourful-and-dynamic-lighting-and-its-limitation> (dostęp: 05.02.2022).
- [12] International Commission on Illumination, *4-61: Artificial lighting and its impact on the natural environment*, <https://cie.co.at/technicalcommittees/artificial-lighting-and-its-impact-natural-environment> (dostęp: 05.02.2022).
- [13] International Commission on Illumination, *2-95: Measurement of obtrusive light and sky glow*, <https://cie.co.at/technicalcommittees/measurement-obtrusive-light-and-sky-glow> (dostęp: 05.02.2022).
- [14] International Commission on Illumination, *Guidelines for minimizing sky glow*, <https://cie.co.at/publications/guidelines-minimizing-sky-glow> (dostęp: 05.02.2022).
- [15] International Commission on Illumination, *Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations, 2nd edition*, <https://cie.co.at/publications/guide-limitation-effects-obtrusive-light-outdoor-lighting-installations-2nd-edition> (dostęp: 05.02.2022).

- [16] International Commission on Illumination, *CIE Workshop on the calculation and measurement of obtrusive lighting*, <https://cie.co.at/news/cie-workshop-calculation-and-measurement-obtrusive-lighting> (dostęp: 05.02.2022).
- [17] Chartered Institution of Building Services Engineers, Society of Light And Lighting (SLL), <https://www.cibse.org/get-involved/societies/society-of-light-and-lighting-sll/about-sll> (dostęp: 05.02.2022).
- [18] Chartered Institution of Building Services Engineers, Society of Light And Lighting (SLL), *LG21 Protecting the night-time environment (2021)*, <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/lg21-protecting-the-night-time-environment> (dostęp: 05.02.2022).
- [19] ROLAN 2022, <https://go.cibse.org/ROLAN22> (dostęp: 15.11.2022).
- [20] Institution of Lighting Professionals, <https://theilp.org.uk/about/> (dostęp: 05.02.2022).
- [21] Schneider-Skalska G., *Środowisko zbudowane*, Architektura dla Edukacji, <https://ade.niaiu.pl/pl/archipedia/srodowisko-zbudowane> (dostęp: 12.04.2022).
- [22] Institution of Lighting Professionals, *Guidance Note 1 for the reduction of obtrusive light 2021*, <https://theilp.org.uk/publication/guidance-note-1-for-the-reduction-of-obtrusive-light-2021/> (dostęp: 05.02.2022).
- [23] Institution of Lighting Professionals, *PLG04 Guidance on undertaking environmental lighting impact assessments*, <https://theilp.org.uk/publication/plg04-guidance-on-undertaking-environmental-lighting-impact-assessments/> (dostęp: 05.02.2022).
- [24] Institution of Lighting Professionals, *PLG05 The brightness of illuminated advertisements*, <https://theilp.org.uk/publication/plg05-the-brightness-of-illuminated-advertisements/> (dostęp: 05.02.2022).
- [25] Institution of Lighting Professionals, *Guidance Note 8 Bats and artificial lighting*, <https://theilp.org.uk/publication/guidance-note-8-bats-and-artificial-lighting/> (dostęp: 05.02.2022).
- [26] International Dark-Sky Association, <https://www.darksky.org/> (dostęp: 05.02.2022).
- [27] International Dark-Sky Association, *IDA-Criteria for Community-Friendly Outdoor Sports Lighting v1.1*, <https://www.darksky.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2021/07/Final-OSL-v1.1.pdf> (dostęp: 05.02.2022).
- [28] International Dark-Sky Association, *Guidance for Electronic Message Centers (EMCs)*, <https://www.darksky.org/wp-content/uploads/2019/05/EMC-Guidelines-IDA2019-1.pdf> (dostęp: 05.02.2022).
- [29] International Dark-Sky Association, *Our Work*, <https://www.darksky.org/our-work/> (dostęp: 05.02.2022).
- [30] Illuminating Engineering Society, <https://www.ies.org/> (dostęp: 05.02.2022).
- [31] Illuminating Engineering Society, Outdoor Environmental Lighting Committee, [https://www.ies.org/about/ies-committees/detail/?committee\\_id=bd2f321a-0050-c35e-4371-0b3c9269117f](https://www.ies.org/about/ies-committees/detail/?committee_id=bd2f321a-0050-c35e-4371-0b3c9269117f) (dostęp: 05.02.2022).
- [32] Illuminating Engineering Society, Outdoor Nighttime Environment Committee, [https://www.ies.org/about/ies-committees/detail/?committee\\_id=bd2f321a-0050-c773-d948-925d7caf4445](https://www.ies.org/about/ies-committees/detail/?committee_id=bd2f321a-0050-c773-d948-925d7caf4445) (dostęp: 05.02.2022).
- [33] ANSI/IES LP-11-20, Environmental Considerations for Outdoor Lighting, <https://store.ies.org/product/lp-11-20-lighting-practice-environmental-considerations-for-outdoor-lighting/> (dostęp: 05.02.2022).
- [34] ANSI/IES RP-39-19, Off-Roadway Sign Luminance, <https://store.ies.org/product/rp-39-19-recommended-practice-off-roadway-sign-luminance/> (dostęp: 05.02.2022).

- [35] United Nations Office for Outer Space Affairs, <https://www.unoosa.org> (dostęp: 05.02.2022).
- [36] International Astronomical Union, <https://www.iau.org/> (dostęp: 05.02.2022).
- [37] Dark and Quiet Skies II for Science and Society Working Group Reports Published, <https://noirlab.edu/public/announcements/ann22002/> (dostęp: 05.02.2022).
- [38] Borre J.V., Paelinckx D., Mücher C.A., Kooistra L., Haest B., Blust G.D., Schmidt A.M., *Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat monitoring: prospects on the way forward*, *Journal for Nature Conservation*, 2011, 19, s. 116–125.
- [39] García-Saenz A., Sanchez-de-Miguel A., Espinosa A., Valentín L., Costas L., Castaño-Vinyals G., Moreno M., Pollán M., Aubé M., Kogevinas M., *Artificial light at night (ALAN), blue light spectrum exposure and colorectal cancer risk in Spain (MCC-Spain study)*, *Environmental Epidemiology*, 2019, 3, s. 212.
- [40] Schroer S., Huggins B.J., Azam C., Hölker F., *Working with Inadequate Tools: Legislative Shortcomings in Protection against Ecological Effects of Artificial Light at Night*, *Sustainability*, 2020, 12, 6, s. 2551.
- [41] Pérez Vega C., Zielinska-Dabkowska K.M., Hölker F., *Urban Lighting Research Transdisciplinary Framework – A Collaborative Process with Lighting Professionals*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18, 2, s. 624.
- [42] Pérez Vega C., Zielinska-Dabkowska K.M., Schroer S., Jechow A., Hölker F., *A Systematic Review for Establishing Relevant Environmental Parameters for Urban Lighting: Translating Research into Practice*, *Sustainability*, 2022, 14, 3, s. 1107.
- [43] COST Association, *ES1204 - Loss of the Night Network (LoNNe)*, <https://www.cost.eu/actions/ES1204/#tabs+Name:Description> (dostęp: 05.02.2022).
- [44] COST Association, About COST, <http://www.cost-lonne.eu/about/> (dostęp: 05.02.2022).
- [45] CORDIS, *HORIZON 2020: A Collective Awareness Platform for Promoting Dark Skies in Europe*, <https://cordis.europa.eu/project/id/688135> (dostęp: 05.02.2022).
- [46] Globe at Night – Sky Brightness Monitoring Network, Current stations, <http://globeatnight-network.org/global-at-night-monitoring-network.html> (dostęp: 05.02.2022).
- [47] Zdziebłowski S., *Ekspertka: zanieczyszczenie światłem jest problemem globalnym*, <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C88617%2Cpolitechnika-gdanska-w-sieci-pomiarow-jasnosci-nieba-i-zanieczyszczenia> (dostęp: 05.02.2022).
- [48] Stowarzyszenie POLARIS – OPP, Sopotnia Wielka, <https://www.polaris.org.pl/> (dostęp: 05.02.2022).
- [49] DarkSkyPoland, *Obszary ochrony ciemnego nieba w Polsce (CN-000)*, <https://ciemnieniebo.pl/pl/obszary-cn-000> (dostęp: 05.02.2022).
- [50] ILLUME, <https://wilis.pg.edu.pl/kg/nauka-i-badania/illume> (dostęp: 05.02.2022).
- [51] KOSMOS. Problemy Nauk Biologicznych, Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika, <https://kosmos.ptpk.org/index.php/Kosmos/about> (dostęp: 05.02.2022).
- [52] AURA - Ochrona Środowiska, <http://aura.edu.pl/> (dostęp: 03.04.2022).
- [53] *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Special Issue "Light Pollution", [https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special\\_issues/SI\\_Light\\_Pollution](https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/SI_Light_Pollution) (dostęp: 05.02.2022).
- [54] DarkSkyPoland, Ogólnopolskie konferencje nt. zanieczyszczenia światłem, I OKZŚ – Warszawa, <https://ciemnieniebo.pl/pl/ogolnopolskie-konferencje-nt-zanieczyszczenia-swiatlem/i-okzs-warszawa> (dostęp: 05.02.2022).

- [55] Uniwersytet Wrocławski, II Ogólnopolska Konferencja na temat Zanieczyszczenia Światłem, <http://okzs.astro.uni.wroc.pl/index.html> (dostęp: 05.02.2022).
- [56] III Ogólnopolska Konferencja na temat Zanieczyszczenia Światłem, Kraków, 25-27 września 2015, <http://lightpollution.pk.edu.pl/konf2015/index.php> (dostęp: 05.02.2022).
- [57] DarkSkyPoland, Ogólnopolskie konferencje nt. zanieczyszczenia światłem, IV OKZŚ – Rzeszów, <https://ciemnieniebo.pl/pl/ogolnopolskie-konferencje-nt-zanieczyszczenia-swiatlem/iv-okzs-rzeszow> (dostęp: 05.02.2022).
- [58] DarkSkyPoland, Ogólnopolskie konferencje nt. zanieczyszczenia światłem, V OKZŚ – Warszawa, <https://ciemnieniebo.pl/pl/ogolnopolskie-konferencje-nt-zanieczyszczenia-swiatlem/v-okzs-warszawa> (dostęp: 05.02.2022).
- [59] Light Pollution Think Tank, <https://noc.edu.pl/> (dostęp: 05.02.2022).
- [60] Hölker F., Moss T., Griefahn B., Kloas W., Voigt C.C., Henckel D., Hänel A., Kappeler P.M., Völker S., Schwoppe A., Franke S., Uhrlandt D., Fischer J., Klenke R., Wolter C., Tockner K., *The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy*, Ecology and Society, 2010, 15, 4, s. 13.
- [61] Fryc I., Bará S., Aubé M., Barentine J.C., Zamorano J., *On the Relation between the Astronomical and Visual Photometric Systems in Specifying the Brightness of the Night Sky for Mesopically Adapted Observers*, LEUKOS, 2021.
- [62] Zielinska-Dabkowska K.M., Xavia K., *Global Approaches to Reduce Light Pollution from Media Architecture and Non-Static, Self-Luminous LED Displays for Mixed-Use Urban Developments*, Sustainability, 2019, 11, s. 3446.
- [63] Jechow A., Schreck G., Kyba C.C.M. et al., *Design and implementation of an illumination system to mimic skyglow at ecosystem level in a large-scale lake enclosure facility*, Scientific Reports, 2021, 11, 2, s. 3478.
- [64] Czaja M., Kolton, M., *How light pollution can affect spring development of urban trees and shrubs*, Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 77, 127753.
- [65] *Dr inż. arch. Karolina M. Zielińska-Dąbkowska członkiem Technicznego Komitetu Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE)*, Politechnika Gdańska, [https://pg.edu.pl/aktualnosci-nauka/-/asset\\_publisher/YXEx3Esulqa8/content/dr-inz-arch-karolina-m-zielinska-dabkowska-czlonkiem-technicznego-komitetu-miedzynarodowej-komisji-oswietleniowej-cie-](https://pg.edu.pl/aktualnosci-nauka/-/asset_publisher/YXEx3Esulqa8/content/dr-inz-arch-karolina-m-zielinska-dabkowska-czlonkiem-technicznego-komitetu-miedzynarodowej-komisji-oswietleniowej-cie-) (dostęp: 05.02.2022).
- [66] *Naukowcy z grupy Illume w Komitecie Technicznym Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE)*, Politechnika Gdańska, <https://pg.edu.pl/aktualnosci/2021-07/naukowcy-z-grupy-illume-w-komitecie-technicznym-miedzynarodowej-komisji> (dostęp: 05.02.2022).
- [67] International Dark Sky Association, IDA Dark Sky Places Committee, <https://www.darksky.org/about/board-of-directors/committees/ida-technical-committee/> (dostęp: 05.02.2022).
- [68] Outdoor Environmental Lighting Committee, [https://www.ies.org/ies-committees/detail/?committee\\_id=bd2f321a-0050-c35e-4371-0b3c9269117f](https://www.ies.org/ies-committees/detail/?committee_id=bd2f321a-0050-c35e-4371-0b3c9269117f) (dostęp: 05.02.2022).

## WHO IS WHO IN LIGHT POLLUTION WORLDWIDE AND IN POLAND

**Abstract:** As evidenced by numerous studies and its impact on astronomical observations, the natural environment, including flora, fauna and humans, artificial light pollution is a significant problem that has involved scientists and the public for some time. In this work, based on the methods of the interview, critical analysis of literature, as well as own experience, the most active organizations, associations and research centers operating in the field of artificial light pollution in the world and in Poland, which contribute to the reduction of this harmful effect, were examined.

**Keywords:** man-made light pollution, artificial light at night, artificial outdoor lighting, scientific research, protection of the night environment

# ŚWIATŁO I CIEMNOŚĆ – ULOTNA SZTUKA ZIEMI

## Julia Giżewska

Wydział Architektury, Politechnika Śląska  
*juliagizewska.kontakt@gmail.com*

## Paweł Białas

Wydział Architektury, Politechnika Śląska  
*pb.pawelbialas@gmail.com*

## Jerzy Wojewódka

Wydział Architektury, Politechnika Śląska  
*jerzy.wojewodka@polsl.pl*

**Streszczenie:** Zanieczyszczenie sztucznym światłem jest coraz bardziej zauważalnym problemem współczesnego świata. Codziennie zamieniamy noc w dzień, dzięki rozwiniętej technologii, nie zważając na drogocenny wpływ naturalnego światła, ciemności i rytmu dobowego na jakość życia niemalże wszystkich organizmów żywych. Artykuł przedstawia przykłady wpływu tego zjawiska na środowisko naturalne oraz człowieka, skalę jego oddziaływania i tempo rozwoju. Porusza także temat głównych źródeł sztucznego oświetlenia, zagłuszających nocny krajobraz oraz egzemplifikuje próby niwelowania negatywnych skutków zanieczyszczenia sztucznym światłem, podejmowane współcześnie. Przedstawiono zagraniczne formy ochrony naturalnego ciemnego nieba oraz przykłady inicjatyw podejmowane na terenie Polski. Na podstawie koncepcyjnego projektu konkursowego land artu zlokalizowanego w Izerskim Parku Ciemnego Nieba, zaprezentowano sposoby poszukiwania korelacji pomiędzy opisanymi zjawiskami a rozwiązaniami architektoniczno-przestrzennymi.

**Słowa kluczowe:** ciemność, światło, rytm dobowy, noc, zanieczyszczenie światłem



# 1. Wstęp

## 1.1. Światło, przysłaniające ciemność

Zjawisko zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba staje się coraz poważniejszym i powszechniejszym problemem w skali globalnej. Pierwsze wzmianki na temat nadmiernej emisji światła do atmosfery ukazały się już w XIX wieku, równocześnie z pojawieniem się pierwszych lamp gazowych oświetlających ulice miast [1]. Badania nad zjawiskiem dotyczącym wpływu zanieczyszczenia światłem na środowisko i organizmy żywe nie były znacząco rozwijane ze względu na ograniczenia technologiczne oraz skalę oddziaływania. Pierwsze próby zostały podjęte w latach 20. XX wieku, badano wówczas wpływ emitowanego światła sztucznego na migracje ptaków [2].

Szybki rozwój sztucznego światła obserwowany jest od lat 50. XX w. Dzięki skrupulatnym pomiarom zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba [3, 4, 5] w 2001 roku oszacowano, że odsetek terenów pod niebem sztucznie rozjaśnionym przekroczył już 10% w 66 krajach świata [5], postępowanie zjawiska szacowane jest na 6% wzrostu w skali roku [6, 7]. Ukazujące się dane zainteresowały badaczy na całym świecie, czego skutkiem było opublikowanie na przełomie XX i XXI wieku szeregu badań, uwzględniających oddziaływanie zjawiska na organizmy żywe. Szczególnym rodzajem badań był wpływ zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba na człowieka, w tym m.in. procesu wydzielania melatoniny w organizmie, zaburzeń rytmu dobowego oraz wpływu na sferę psychiczną [8, 9, 10, 11]. Postępujące zanieczyszczenie sztucznym światłem jest korelowane z urbanizacją i rozrostem infrastruktury, obserwowanym obecnie niemalże na całym świecie.

Aktualne badania wykazują, że najwyższy poziom zanieczyszczenia światłem sztucznym występuje w trzech głównych regionach, na szerokościach geograficznych: od 30° N do 60° N, w Europie, Ameryce Północnej (USA) i Azji Wschodniej [11, 12]. Opublikowane w 2021 roku wyniki badań wykazują znaczny wzrost zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba na obszarach chronionych, co jednoznacznie potwierdza rozprzestrzenianie się zjawiska – aż 56% badanych obszarów zostało zanieczyszczonych emitowanym światłem w latach od 1992 do 2018. Przeprowadzona analiza pozwoliła wytypować przestrzenie, które w najbliższych latach będą borykać się z postępującymi zanieczyszczeniami sztucznym światłem. Są to miejsca, w których aktualnie obserwuje się zjawisko intensywnej urbanizacji – Ameryka Południowa, Afryka oraz Chiny.

Podczas procesu rozwoju państw i miast warto wprowadzać rozwiązania, które pomogą zredukować lub zminimalizować zanieczyszczenie sztucznym światłem. Przykładem zastosowań takich regulacji jest Japonia, w której ogranicza się ilość emitowanego światła do atmosfery. Dane wykazują, że na niektórych z badanych obszarów chronionych w Japonii, zjawisko zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba pomniejsza się. Zatem potwierdza to tezę, że istnieją skuteczne metody niwelowania rozprzestrzeniania się tego zjawiska [13]. Również w wielu

innych krajach podejmowane są inicjatywy mające na celu ograniczenie zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba. Działania mają różnorodną formę – regulacji prawnych, działań organizacji i stowarzyszeń związanych z tematyką zanieczyszczenia sztucznym światłem atmosfery, inicjatyw społecznych oraz aktywności popularyzatorskich.

## 2. Metody badawcze

Zarówno ilość, jak i barwa światła emitowanego do atmosfery ma znaczenie. Światło niebieskie, najbardziej szkodliwe dla człowieka i środowiska, rozjaśnia nocne niebo najbardziej. Jego dużą ilość w swoim widmie zawierają oprawy LED oraz metalohalogenkowe. Dzięki badaniom przeprowadzonym przez International Dark-Sky Association (IDA) zaleca się stosowanie do oświetlenia zewnętrznego tylko barw ciepłych poniżej 3000 K [14]. Im większy strumień światła, tym jaśniejsze nocne niebo, dlatego łatwo mierzalnym wskaźnikiem stanu zanieczyszczenia sztucznym światłem jest poziom jasności nocnego nieba (NSB – *Night Sky Brightness*). Wypracowane przez badaczy różnorodne metody pomiarów mają ogromne znaczenie dla dokładniejszego poznania zjawiska.

Techniki badawcze różnią się wykorzystaniem instrumentu pomiarowego i dzielą się na dwie grupy: w pierwszej wykorzystywane są zmysły człowieka (metody wizualne), a w drugiej dedykowane urządzenia miernicze (metody instrumentalne). Metody wizualne bazują na możliwościach ludzkiego oka. Jaśniejsze niebo powoduje, że na nieboskłonie można dostrzec jedynie najjaśniejsze gwiazdy. Ciała niebieskie, które zauważyć można jedynie w kompletnej ciemności, stają się niewidoczne dla ludzkiego oka. Bazując na tym zjawisku, wypracowano kilka metod pomiaru poziomu zanieczyszczenia sztucznym światłem. Metody te polegają na wyznaczeniu jasności najślabiej widocznych gwiazd lub oszacowaniu liczby widocznych gwiazd [14, 17, 18].

Wykorzystanie technologii zdecydowanie ułatwia badania i pozwala uzyskać konkretniejsze wyniki, określające poziom zanieczyszczenia. Dokładność pomiaru zależy jednak od zaawansowania urządzenia i metody, jaka jest używana do prowadzenia obserwacji. Do badań nad jasnością nocnego nieba wykorzystuje się fotometrię (instrumenty SQM – *Sky Quality Meter*) lub zdjęcia nieba uzyskane przy pomocy aparatów cyfrowych i teleskopów, które pozwalają dokładniej wyznaczyć jasność nieba. Do badań nad rozprzestrzenianiem się zjawiska i jego skali globalnej używa się zdjęć satelitarnych. Uzyskane wyniki pozwalają aktualizować bazy danych i mapy zanieczyszczenia światłem, ukazując skalę zjawiska. Za pomocą powyższych metod można zbadać jasność i skalę zjawiska, jednak do badania widm nocnego nieba potrzebne są specjalne urządzenia miernicze, takie jak spektrograf [14, 17, 18].

Zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba jest efektem industrializacji i rozwoju gospodarczego. Chociaż emitowanie światła w nocy poprawiło jakość ludzkiego życia i jest kojarzone z bezpieczeństwem i nowoczesnością, w wielu aspektach można je ograniczyć bez umniejszania komfortu życia [6]. Głównymi źródłami emitowania sztucznego światła są latarnie uliczne (oświetlenie obiektów

komunikacyjnych), oświetlenie parkingów/obiektów sportowych, oświetlenie zewnętrzne, reklamy i szyldy. Istotnym zagadnieniem jest umiejscowienie wymienionych elementów w szerszym kontekście, w wielu przypadkach źródła światła znajdują się w miejscach, w których są zbędne [12, 19, 20]. Oprócz lokalizacji, ważnym zagadnieniem jest również dobór odpowiednich opraw i osłon, które mogą znacznie zminimalizować szkodliwe oddziaływanie. Szacuje się, że 30% sztucznego światła jest emitowane przez niewłaściwie zaprojektowane oświetlenie, najczęściej nieprawidłowo skierowane w innym kierunku od przewidywanego (tj. w górę). W celu wytworzenia tak dużych ilości energii elektrycznej, która i tak finalnie jest marnowana, elektrownie zasilane przede wszystkim węglem co roku emitują do atmosfery około 15 milionów ton zanieczyszczenia dwutlenkiem węgla [19, 20]. Międzynarodowe Stowarzyszenie Ciemnego Nieba szacuje, że 33% emitowanego światła sztucznego jest marnowane przy rocznym koszcie wynoszącym 2,2 miliarda dolarów. Wytwarzanie elektryczności na potrzeby oświetlenia powoduje tak duże zanieczyszczenie powietrza, że jego usunięcie byłoby równoznaczne z usunięciem 9,5 mln samochodów z dróg [19, 20].

### 3. Skutki zanieczyszczenia

Zanieczyszczenie sztucznym światłem można odczytywać w różnych kategoriach i formach. Istnieje kilka rodzajów zjawisk, będących efektem emitowania światła sztucznego. Każde z nich bezpośrednio koreluje z człowiekiem, wpływając na jego samopoczucie oraz zachowania. Zjawisko olśnienia, najczęściej spowodowane przez niewłaściwie ukierunkowany strumień świetlny charakteryzuje się wysoką jasnością źródła światła, powodującą dyskomfort wizualny. Może ono stanowić zagrożenie dla zdrowia publicznego – szczególnie dla osób starszych. Wraz z wiekiem, na skutek dyfuzji czerwonych ciałek krwi, zmniejsza się przezroczystość soczewki. W rezultacie światło ulega rozproszeniu i po dotarciu do siatkówki nakłada się na obraz ogniskowanego na niej przedmiotu obserwacji, powodując tzw. luminancję zamglenia, której obecność powoduje występowanie olśnienia przeszkadzającego. Zjawisko wpływa również niekorzystnie na nocną faunę.

Zgodnie z szacunkami naukowymi, olśnienie jest przyczyną śmierci około miliona ptaków rocznie. Zwierzęta oślepienie podczas lotu wpadają na przeszkody zlokalizowane blisko źródeł światła. Niebagatelny wpływ na życie ludzi ma również występowanie rozjaśnienia nocnego nieba (tak zwanej łuny światła) nad zurbanizowanymi obszarami, które zawiera w sobie światło odbite oraz to skierowane w górę (niewykorzystane). Z tego powodu nocne niebo nad obszarami zurbanizowanymi ma często barwę jasnożółtą lub pomarańczową.

„W większości miast niebo wygląda tak, jakby zostało opróżnione z gwiazd, pozostawiając za sobą pustą mgiełkę, która odzwierciedla nasz strach przed ciemnością i przypomina miejską poświatę z dystopijnych science fiction.” [21]

„Szacuje się, że w Stanach Zjednoczonych 80% populacji, a w Unii Europejskiej 67%, mieszka na obszarach, w których nocne niebo nigdy nie jest ciemniejsze niż przy księżycu świecącym w pełni.” [12]

Na terenach zurbanizowanych występują częste i nadmiernie jasne ugrupowania wielu źródeł światła sztucznego, wprowadzając bałagan. Takie warunki stwarzają możliwość zaistnienia zjawiska zanieczyszczenia światłem sztucznym, które wpływa na komfort życia poszczególnych jednostek. Ten powszechny problem obecny w miastach, dotyczy obiektów mieszkalnych, zlokalizowanych blisko infrastruktury oświetleniowej, zachodzi wówczas, gdy niepożądane światło pada w miejsca, w których nie powinno być obecne [12, 21, 22].

#### 4. Obszary chronione

Problem zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem zaczyna być uwzględniany w coraz szerszych kręgach. Dzięki wzrastającej świadomości zaczęto szukać sposobów ochrony ciemności. Jednym z nich są specjalne obszary, na których ustanowiono ochronę prawną naturalnie ciemnego nieba. Pierwszą przestrzenią na świecie, na której wprowadzono taką formę protekcji był Stanowy Obszar Rekreacyjny Lake Hudson w stanie Michigan w Stanach Zjednoczonych w 1993 roku. Od tego momentu podobną ochroną objęto wiele innych obszarów, głównie w Europie (również w Polsce) i Ameryce Południowej [12].

Na przestrzeni lat powstały organizacje i stowarzyszenia zrzeszające osoby aktywnie działające na rzecz ochrony naturalnej ciemności. Jedną z ważniejszych organizacji, chroniącej nocny krajobraz i prowadzącej badania nad zjawiskiem zanieczyszczenia sztucznym światłem jest, powstała w 1988 roku w USA The International Dark-Sky Association (IDA). Dzięki niej certyfikowana lista obszarów, chroniących ciemne niebo powiększyła się o kolejne miejsca (International Dark Sky Parks, International Dark Sky Reserves, International Dark Sky Sanctuaries, Urban Night Sky Places oraz International Dark Sky Communities). Organizacja certyfikuje (program FSA) również oświetlenia zewnętrzne, które są przyjazne dla ochrony ciemnego nieba [14].

#### 5. Formy ochrony ciemnego nieba

Istnieją różne sposoby rozszerzania ochrony nad naturalną ciemnością. Przeciwdziałanie zanieczyszczeniu sztucznym światłem zaczyna być coraz częstszym postulatem badaczy i ekologów. Badania jednoznacznie wykazują niekorzystny wpływ zjawiska na człowieka i środowisko naturalne – porównywalny do zanieczyszczenia powietrza czy gleby. Jednak wciąż zanieczyszczenie sztucznym światłem nie jest powszechnie uważane za istotne zagrożenie. Ważnymi aktywnościami poprawiającymi terazniejsze postrzeganie problemu są działania edukacyjne i popularyzatorskie, które mają na celu propagowanie skali oddziaływania zjawiska. Bez edukacji

i powszechnego zaangażowania niezwykle trudno będzie ograniczyć wzrost zanieczyszczenia światłem. Załączkiem działań na skalę globalną mogą być aktywności indywidualne. Można do nich zaliczyć ograniczenie oświetlenia zewnętrznego, wymianę opraw oraz zwrócenie uwagi na komfort innych użytkowników przestrzeni. Działania indywidualne polepszą komfort życia jednostek oraz ich najbliższego otoczenia, jednak prawdziwym wyzwaniem będą działania na większą skalę, które powinny zostać obwarowane odpowiednim ustawodawstwem w zakresie ochrony nocnego krajobrazu (np. zastosowane w Japonii [13]) połączone z wytyczeniem obszarów, w których bezwarunkowo chroniona jest ciemność (rezerwatów ciemnego nieba).

Odpowiednie działania mogą wpłynąć znacząco na środowisko naturalne, komfort życia człowieka w miastach oraz obniżyć koszty eksploatacji infrastruktury oświetleniowej. Wymóg montowania nowoczesnych opraw oświetleniowych ograniczających emitowanie sztucznego światła w niepożądanych kierunkach [12, 14], mógłby być zaczątkiem wielu pozytywnych zmian. Dobór odpowiedniego oświetlenia zewnętrznego, niwelującego zanieczyszczenie sztucznym światłem jest istotny dla ochrony nocnego krajobrazu. Oświetlenie zewnętrzne powinno włączać się tylko w razie potrzeby i być wyposażone w oprawę, która oświetli tylko konkretny obszar. Źródło światła powinno być tak dobrane, aby minimalizować emisję niebieskiego światła [14]. Przykładem takich działań jest francuskie miasto Tuluza, gdzie wprowadzono innowacyjną technologię oświetleniową, polegającą na wyposażeniu latarni w czujniki wyczuwające ciepło ludzkiego ciała. Gdy człowiek zbliży się na odpowiednią odległość, lampa rozjaśnia się, a następnie przechodzi w stan przygaszenia. Celem projektu jest zmniejszenie zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba oraz obniżenie kosztów utrzymania oświetlenia [23].

Formami ochrony ciemnego nieba są także regulacje prawne. Pierwszym krajem, który uchwalił przepisy prawne traktujące o zanieczyszczeniu sztucznym światłem nocnego nieba była Republika Czeska. W 2002 r. podpisano „Ustawę o ochronie atmosfery”, która zakazywała montowania źródeł emitujących światło powyżej linii horyzontu oraz zobowiązywała obywateli kraju do podejmowania działań zapobiegawczych rozwojowi zanieczyszczenia sztucznym światłem. Obywatele i podmioty, które nie stosują się do tego prawa, podlegają karze pieniężnej [24]. Istotnymi przykładami regulacji prawnych są również ustawa „O jakości powietrza i ochronie atmosfery” obowiązująca w Hiszpanii od 2007 roku na terenie całego kraju oraz szereg regulacji wprowadzanych przez włoskie parlamenty lokalne (przykład zapisów przyjętych w Lombardii jest uważany za wzór dla tworzenia nowych ustaw i regulacji) [25].

## 6. Sytuacja w Polsce

Aktualnie na terenie Polski nie istnieje ustawodawstwo chroniące nocny krajobraz, jednak dzięki inicjatywom i zaangażowaniu aktywistów stworzono listę miejsc, w których podjęto próby działań chroniących ciemność. Listę podzielono na miejsca o różnej charakterystyce i jakości ciemnego nieba – od przestrzeni, na których

występuje naturalne ciemne niebo, aż po miejsca, na których istnieje zanieczyszczenie sztucznym światłem, lecz podjęto działania je niwelujące. Najbardziej znaczącą formą ochrony związaną z wytyczeniem obszarów ochronnych są rezerваты ciemnego nieba, które charakteryzują się występowaniem naturalnie ciemnego nieba. Dodatkowo dla jego ochrony wytycza się specjalne strefy buforowe, które mają za zadanie ograniczenie emitowania sztucznego światła do atmosfery w okolicach rezerwatu. W Polsce, której powierzchnia wynosi 312 679 km<sup>2</sup>, nie istnieje żaden teren, który spełniałby wymóg występowania naturalnej ciemności.

Mniej restrykcyjną formą ochrony nocnego krajobrazu są parki ciemnego nieba, charakteryzujące się występowaniem bardzo dobrej jakości ciemnego nieba, aczkolwiek podatnej na wpływ zanieczyszczenia światłem. W Polsce znajdują się dwa parki ciemnego nieba spełniające wymienione warunki (CN-003 – Izerski Park Ciemnego Nieba oraz CN-004 – Park Gwiazdowego Nieba Bieszczady). Dla ochrony ciemności przed zanieczyszczeniami świetlnymi należy podjąć działania popularyzatorskie i edukacyjne oraz wprowadzić zasady niwelujące emitowanie sztucznego światła nocą w okolicy parku.

Obszary ciemnego nieba to przestrzenie, w których świadomie zdecydowano się na niwelowanie zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba. Rozróżnia się również miejsca i punkty z redukcją zanieczyszczenia sztucznym światłem, czyli niewielkie obszary, na których świadomie zredukowane jest emitowanie sztucznego światła ze względu na środowisko naturalne. Połączenie kilku takich punktów i miejsc może stworzyć obszar ciemnego nieba. W Polsce znajdują się dwa obszary ciemnego nieba (CN-001 – Sopotnia Wielka oraz CN-005 – Ostoja Ciemnego Nieba) oraz jedno miejsce z redukcją zanieczyszczenia sztucznym światłem (CN-002 – Palowice) [15]. Łącznie zainicjowano powstanie pięciu miejsc poświęconych ochronie ciemności i zjawisku zanieczyszczenia sztucznym światłem, które wykazano w tabeli 1. Każde z nich posiada inne walory przyrodnicze, jednak łączy je powstanie licznych programów badawczych, edukacyjnych i popularyzatorskich związanych z ciemnością. Działania te podjęte zostały w znacznej części przez środowiska astronomiczne i studenckie.

Tabela 1. Miejsca w Polsce chroniące nocny krajobraz wg Stowarzyszenia POLARIS- OPP

Nazwa i nr miejsca	Typ	Lokalizacja	Rok założenia	Podjęte działania
CN-001 – Sopotnia Wielka	obszar ciemnego nieba	gm. Jeleśnia, pow. Żywiec, woj. śląskie	2011	wygaszanie na terenie wsi Sopotnia Wielka oświetlenia ulicznego nocą, modernizacja oświetlenia na terenie wsi, przeprowadzenie kampanii informacyjno-edukacyjnej, organizacja wydarzeń tematycznych [15]

Tabela 1. (cd.)

CN-002 – Palowice	miejsca i punkty z redukcją zanieczyszczenia sztucznym światłem	gm. Czerwionka–Leszczyzna, pow. Rybnik, woj. śląskie	2008	modernizacja oświetlenia na terenie wsi Palowice, przeprowadzenie kampanii informacyjno-edukacyjnej [15]
CN-003 – Izerski Park Ciemnego Nieba	park ciemnego nieba	Góry Izerskie, dolina Izery, gm. Świeradów-Zdrój, pow. lubański, woj. dolnośląskie	2009	ochrona środowiska nocnego, kampania informacyjno-edukacyjna, inwestycje w działania popularyzatorskie i edukacyjne, organizacja wydarzeń tematycznych [15, 26]
CN-004 – Park Gwiezdnego Nieba Bieszczady	park ciemnego nieba	gm. Lutowiska oraz Cisna, część gm. Komańcza, Baligród, Solina oraz Czarna–Górna, pow. Bieszczadzki, woj. podkarpackie	2013	ochrona środowiska nocnego, kampania informacyjna, inwestycje w działania popularyzatorskie i edukacyjne, organizacja wydarzeń tematycznych [15, 27]
CN-005 – Ostoja Ciemnego Nieba	obszar ciemnego nieba	soł. Izdebno oraz Chalini, gm. Sieraków, pow. Międzychodzki, woj. wielkopolskie	2012	kampania informacyjno-edukacyjna, inwestycje w działania popularyzatorskie i edukacyjne, organizacja wydarzeń tematycznych, modernizacja oświetlenia na terenie sołectw [15]

Źródło: opracowanie własne na podstawie netografii ([ciemnieniebo.pl](http://ciemnieniebo.pl), [www.izera-darksky.eu](http://www.izera-darksky.eu) oraz [www.gwiezdnebieszczady.pl](http://www.gwiezdnebieszczady.pl)).

## 7. Rytm dobowy

Nasze życie ukształtowane jest w rytmie wyznaczonym przez Słońce. Nawet położenie Ziemi w Układzie Słonecznym sugeruje, jak ważną rolę pełni – jest na tyle blisko, że woda na niej nie zamarza i na tyle daleko, że nie ulega wyparowaniu. Reakcje katalizowane przez promienie słoneczne pozwoliły, około miliard czterysta milionów lat temu, aby w oceanach powstały pierwsze organizmy jednokomórkowe – sinice, które na drodze ewolucji wykształciły w sobie rytm dobowy. Dzięki temu zachodziły w nich procesy, w wyniku których produkowały energię chemiczną, zamieniając ją później na cukier, efektem ubocznym tego był tlen, powoli budujący atmosferę ziemską. Kolejne miliony lat wzbogaciły środowisko ziemskie o nowe organizmy, między innymi ludzi.

Światło słoneczne pozwoliło naszemu gatunkowi na odczuwanie i zrozumienie czasu, poprzez stworzenie szlaków neuronalnych [28]. Słońce nadało rytm reakcjom biochemicznym, zachodzącym w naszym organizmie, pomogło ukształtować struktury społeczne. Praca w grupie czy nauka w szkole jest znacznie łatwiejsza wtedy, gdy jemy,

czujemy zmęczenie, senność mniej więcej o tych samych porach. W zasadzie wszystkie czynności, które wykonujemy w trakcie doby, są dostosowane do dnia i nocy – jasności i ciemności. Te dwa zjawiska niosą w sobie duży potencjał leczniczy. Z historii znane jest leczenie promieniami słonecznymi – helioterapia, której ojcem był grecki lekarz Herodot. Przełom wieku XVIII i XIX to moment, w którym Słońcem zaczęto leczyć m.in. gruźlicę czy reumatyzm [29]. Obecnie wciąż trwają badania nad rozwojem metod, wykorzystujących dobroczynne działanie promieni i usłonecznienia. Jak czytamy w opracowaniu M. Kuczmarskiego:

[...] Przydatność usłonecznienia dla helioterapii należy rozumieć z jednej strony jako przydatność jakościową, z drugiej zaś strony jako ilościową. Pod pojęciem jakościowym należy rozumieć usłonecznienie ze składową promieniowania nadfioletowego, ponieważ to promieniowanie ma zasadnicze znaczenie dla helioterapii. Nie znaczy to, że pomija się przydatność leczniczą części widzialnej i podczerwonej widma promieniowania słonecznego. Wychodzi się bowiem z założenia — upraszczając zagadnienie — jednoczesności występowania promieniowania nadfioletowego z promieniowaniem widzialnym i podczerwonym, a nie odwrotnie. Na biologiczne znaczenie usłonecznienia ma wpływ przede wszystkim wysokość Słońca nad horyzontem, wzniesienie nad poziomem morza, zawartość ozonu w górnych warstwach atmosfery, przezroczystość atmosfery i wielkość zachmurzenia. Natomiast przez ilościową wartość usłonecznienia dla helioterapii należy rozumieć liczbę godzin usłonecznienia o odpowiedniej zdolności wywoływania rumienia, którą można wykorzystać do leczenia w odpowiedniej porze dnia danego miesiąca. Na tę ilościową przydatność składają się przede wszystkim warunki meteorologiczne lub klimatyczne (zależnie od skali czasowej ujęcia zagadnienia) [...] [30].

Zdrowotne wartości nocy znajdują swoje miejsce również w dzisiejszej medycynie. Leczenia ciemnością możemy doświadczać codziennie podczas snu. Odpowiednio przygotowana przestrzeń, pozbawiona sztucznego światła, lampek nocnych lub ulicznych latarni pomaga naszemu organizmowi wytwarzać melatoninę, niezbędną do prawidłowego funkcjonowania. To tylko jeden z licznych drogocennych procesów zachodzących podczas snu. Jeśli nasze ciało przez dłuższy czas będzie pozbawiane możliwości nocnej regeneracji, będziemy nie tylko rozdrażnieni i mniej skłonni do efektywnej pracy, ale także, jak wskazują badania, możemy być bardziej narażeni na zachorowanie na m.in. choroby psychiczne lub nawet nowotworowe [28]. Zatem praca zmianowa, która w XIX wieku wydawała się wybawieniem, teraz, przynajmniej w niektórych sektorach, przynosi coraz więcej wątpliwości. Być może nie jest już tak zasadna, jak wydawała się kiedyś, na co wskazują fakty.

Sztuczne oświetlenie rozwijające się podczas rewolucji przemysłowej zwiększało wydajność pracy. Rozrastające się fabryki, rosnący popyt, urbanizacja – te wszystkie czynniki niezwykle sprzyjały wydłużeniu godzin pracy. Ironia sprawiła, że obecnie najwięcej katastrof przemysłowych dzieje się właśnie nocą, a wynikają głównie z zaniechań pracowników, które są spowodowane niskim poziomem koncentracji. W tym miejscu warto wspomnieć również o postrzeganiu nocy indywidualnie przez człowieka. Jest to ściśle połączone z rytmem dobowym, ponieważ czynności, które



wykonywano nocą lub w ciągu dnia były często uzależnione od obawy. Noc przez wieki budziła lęk, kojarzyła się z czymś niepewnym wręcz niebezpiecznym. Ludy pierwotne obawiały się natarć dzikich zwierząt na obozowiska, później, gdy zaczęto szukać szeroko pojętej duchowości, z nocą i ciemnością utożsamiano tajemnicę lub karę. Z podań ludowych wynika, że to właśnie w mroku grzeszników nawiedzały demony i grasowały wampiry. Noc zaczęto oswajać wraz z wykorzystaniem płomienia, a później bardziej rozwiniętego sztucznego oświetlenia np. gazowego. Co ciekawe, w malarstwie nokturny zaczęły być obecne właśnie wtedy, gdy nocy przestano się lękać. Określenie nocnego życia, wieczorne spektakle i kawiarnie otwarte do późnych godzin pojawiły się dopiero pod koniec lat 70. XIX wieku:

Gdy gaz rozpowszechnił się w miastach i rozświetlił po zmierzchu ulice miast, nadeszła nowa era życia towarzyskiego oraz wszelkiej konsumpcji. Ludzie nie musieli już po zmierzchu czmychać z promenady a długość dnia została dostosowana do ich zachcianek. Mieszczanie mieli teraz na podporządku swoje własne, posłuszne ich życzeniom gwiazdy [31].

Przykładem ukazującym próbę wprowadzenia rytmu dobowego w życie społeczności jest niemieckie miasto Bad Kissingen, które w XIX w. zasłynęło jako kurort uzdrowiskowy. Od niedawna określa się jako pierwsze na świecie chronocity, czyli miejsce uwzględniające czas wewnętrzny (biologiczny) i sen, w kształtowaniu codziennego życia – miejsc pracy, szkół, klinik itp. Autorem tej idei jest Michael Wieden, który zafascynowany doniesieniami o odkryciach chronobiologicznych doszedł do wniosku, że uwzględnienie tych zasad w tkance miejskiej może nie tylko poprawić komfort i jakość życia mieszkańców, ale także stać się czynnikiem wyróżniającym je na tle innych miejscowości leczniczych.

Wieden rozpoczął współpracę z chronobiologiem Thomasem Kantermannem, na początku tworząc wspólny manifest, zakładający m.in. późniejsze zajęcia w szkołach, brak egzaminów rano, elastyczny czas pracy dla pracowników, który umożliwiłby ludziom o chronotypach wieczornych aktywizować się wtedy, kiedy ich wydajność jest największa, zakładający prowadzenie praktyk leczniczych w dziedzinie chronoterapii, dostosowanie szeroko pojętego leczenia farmakologicznego do wewnętrznego zegara pacjentów, zmiany w projektowanych obiektach umożliwiające wprowadzenie jak największej ilości światła do wnętrza. W lipcu 2013 roku Kantermann i Wieden, a także burmistrz i rada miasta Bad Kissingen oraz współpracownicy naukowcy Kanteramanna sporządzili list intencyjny, w którym zobowiązali się do popularyzowania badań oraz odkryć chronobiologicznych w mieście i uczynienia Bad Kissingen jedynym na świecie miejscem, które może posłużyć jako obszar do prowadzenia naukowych badań terenowych w szerszym kontekście. Obecnie w mieście powoli są wprowadzane zmiany opisane w manifestie, które poprawią jakość życia mieszkańców i kuracjuszy [28].

## 8. Przestrzeń budująca świadomość

Architektura ilustruje rzeczywistość, często jest odpowiedzią lub komentarzem do zdarzeń, zapisujących się na kartach historii. Projekt koncepcyjny „Teatr Światła” powstał jako reakcja na rosnący problem zanieczyszczenia atmosfery sztucznym światłem. Jego celem nie jest jedynie budowanie świadomości, dotyczącej wpływu emisji sztucznego oświetlenia na życie ludzi, zwierząt i roślin, ale także wskazywanie istotności rytmu dobowego i roli naturalnej jasności i ciemności w życiu człowieka. Założenie zostało zlokalizowane na Polanie Izerskiej, będącej częścią jedyne go na świecie transgranicznego Parku Ciemnego Nieba w Górach Izerskich. Umiejscowiony na granicy Polski i Czech, powstał w 2009 roku w ramach Międzynarodowego Roku Astronomii. Jego głównym inicjatorem jest Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego, współpracujący z innymi jednostkami wspierającymi inicjatywę (m.in. Instytutem Astronomicznym Akademii Nauk Republiki Czeskiej). Park został powołany na podstawie umowy między powyższymi instytucjami oraz w porozumieniu z przedstawicielami gminy Świeradów-Zdrój [26].

Projekt „Teatr Światła” (rys. 1) polega na stworzeniu rozległego land artu [32], symbolicznego teatru światła, miejsca, w którym możemy, poprzez obserwację fragmentu nieba, stać się obserwatorami czarującego spektaklu – światła i ciemności. Te dwa nierozzerwalnie połączone ze sobą zjawiska wzajemnie się uzupełniają, określając jednocześnie cykl, w którym żyjemy. Land art jest reinterpretacją starożytnego amfiteatru, kierującego uwagę widza na scenę, słowo, aktora. W tym przypadku te trzy elementy są zastąpione niebem – dziennym i nocnym, naturalnymi dźwiękami i zjawiskami atmosferycznymi. Okrąg, będący kulminacyjnym miejscem projektu, również stanowi bezpośrednie odwołanie do formy amfiteatru, jest niejako jego syntezą. Bogata symbolika tej formy otwiera wiele dróg interpretacji. Okrąg – koło, tak jak Światło jest symbolem Boga, kosmosu... Jest kształtem równowagi, doskonałości, nieprzerwanej harmonii, która łączy w sobie wieczny ruch. Oprócz tego kształt ten jest wykorzystywany w planetariach, umożliwia tworzenie przestrzeni najbardziej sprzyjających obserwacjom sklepienia. W projekcie na jego śladzie został wytyczony rów, który zmusza odwiedzających do obserwacji wykadrowanego widoku nieboskłonu. Musimy spojrzeć wyżej – podnieść wzrok, żeby doświadczyć widowiska, ograniczonego krawędziami wydrążenia. Skala założenia sprzyja wywołaniu poczucia, że jako ludzie jesteśmy częścią pewnej ogromnej całości, której granice są wręcz niemożliwe do wyznaczenia.

Podobnie jak w sztuce, najlepszym sposobem, aby coś zobaczyć i poczuć, jest stworzenie więzi między widzem a dziełem sztuki, którym w tym przypadku jest wszechogarniające niebo. Do okręgu teatralnego prowadzi długa drewniana ława, będąca swoistym przewodnikiem, pozwalającym zatrzymać się w każdym momencie drogi i podziwiać rozpraszające się wokół światło. Projekt jest jedynie dla niego tłem, narzędziem do obserwacji, spokojnym miejscem do odpoczynku, które pozwala uchwycić ulotny krajobraz dnia i nocy. „Teatr światła” zwraca uwagę nie tylko na piękno nocnego firmamentu, ale także światła dziennego zmieniającego się wraz

z porami dnia. Pozornie drobne gwiazdy, ciała niebieskie czy Droga Mleczna są równie warte uwagi, co unikatowość zimowego słońca czy promienie mieniące się w deszczowych, wiosennych kroplach. Land art uczy wrażliwości na pozornie niezauważalne. Tworzy przestrzeń umożliwiającą obserwacje różnorodnych scen, które kulminują się w formie oczekiwanego katharsis.



**Rys. 1.** Lokalizacja i krajobraz

*Źródło: materiały konkursowe International Velux Award 2020 (Teatr Światła – opracowanie własne).*

## 9. Wyzwania w obliczu realizacji

Realizacja land artu wbrew pozorom jest sporym wyzwaniem. Należy jednak pamiętać, że w przypadku takich założeń kluczowa jest lokalizacja, często nietatwa – wymagająca przystosowania do użytkowania przestrzeni przez różne grupy odbiorców. Trudności mogą wynikać z ukształtowania terenu, szaty roślinnej, rodzaju gruntu, nośności, nasłonecznienia. W przypadku „Teatru światła” najważniejszym aspektem jest znalezienie miejsca, które umożliwiłoby jak najbardziej efektywną obserwację nocnego krajobrazu nieba. Zatem obszar przeznaczony na realizację zadania projektowego powinien być zlokalizowany na terenie niezurbanizowanym lub pozwalającym na neutralizację łun emitowanego sztucznego światła. To wymaga wykonania poszerzonych analiz kontekstu, wykonanych w różnych czasookresach, obejmujących nie tylko porę nocną, ale również uwzględniając nasłonecznienie oraz klimat i pory roku.

## 10. Uwarunkowania techniczne

### 10.1. Spadek terenu – ukształtowanie połaci płaszczyzny realizacyjnej land artu

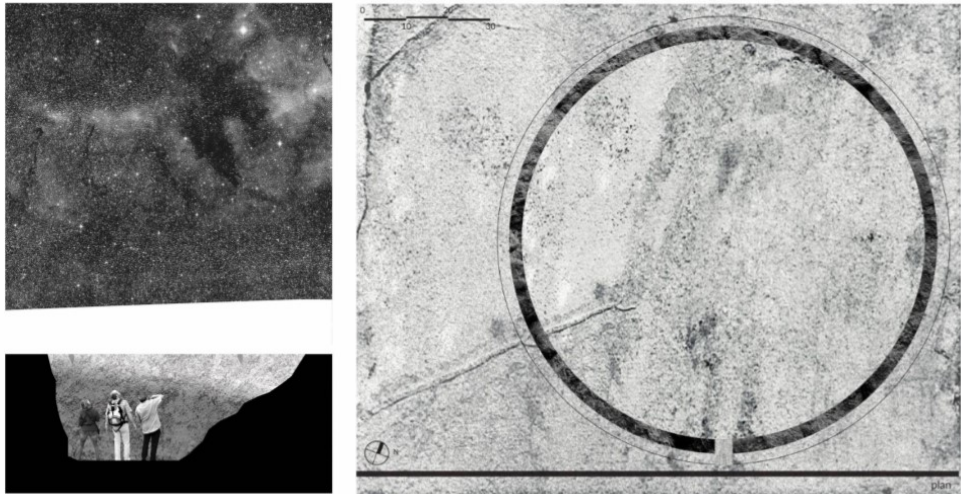
Topografia terenu – ukształtowanie połaci płaszczyzny realizacyjnej jest również kluczową kwestią. Pierwotnie, projekt koncepcyjny był zlokalizowany na terenie Polany Izerskiej, w okolicach schroniska Chatka Górzystów. Jednak, jak wiadomo, jest to teren pod ścisłą ochroną przyrodniczą, na którym znajdują się m.in. miejsca lęgowe rzadkich gatunków zwierząt. Oprócz tego teren obfituje w unikatowe torfowiska. Dzięki stosunkowo płaskiemu obszarowi, który delikatnie wznosi się ku górze na obrzeżach polany, land art byłby ujęty w bardzo korzystnej perspektywie, umożliwiającej zobaczenie jak koreluje z otoczeniem, niemalże się w niego wtapiając. Takie rozwiązanie zapewniałoby także możliwość obserwacji nocnego sklepienia, w zasadzie niezakłóconego luną sztucznego światła.



**Rys. 2.** Polana Izerska, wizualizacja land artu

*Źródło: opracowanie własne.*

Niestety, przepisy jakie obowiązują na terenie parków krajobrazowych, a tak zlokalizowana jest między innymi przestrzeń Polany Izerskiej, nie pozwalają na żadnego typu ingerencje „obce” w zastany ekosystem fauny i flory. W efekcie, jeśli projekt miałby zostać zrealizowany, należy znaleźć odpowiednik opisanej powyżej lokalizacji, która również oferowałaby doświadczenie światła dnia, nocy oraz zjawisk towarzyszących różnym stanom atmosferycznym. Trzeba jednak pamiętać, aby teren, który pozwoli na realizację zadania obserwatorium nocnego nieba nie był na zbyt pochyłej płaszczyźnie, bowiem przebywając we „wnętrzu” okopu obserwacyjnego, obserwator powinien być niezauważalny dla innych użytkowników. Istotnym warunkiem byłoby jednak pozyskanie terenu, którego spadek płaszczyzny głównej nie przekraczałby maksymalnie 5–7%, co i tak na takim dystansie dawałoby różnice wysokości pomiędzy przeciwległymi bokami okręgu, rzędu 250–350 cm (rys. 3).



**Rys. 3.** Land art.: schemat ideowy przekroju i rzutu  
*Źródło: materiały konkursowe International Velux Award 2020  
 (Teatr Światła – opracowanie własne).*

## 10.2. Odwodnienie

Odwodnienie liniowe poprzeczne i wzdłużne, to są kolejne ważne zagadnienia techniczne dotyczące projektu. Niezbędne będzie zaangażowanie do projektu specjalistów z zakresu hydrologii gruntów, poprzedzone wcześniejszymi badaniami geologicznymi warstw nośnych gruntu, jego nasiąkliwości, przepuszczalności i stabilności powierzchniowej, wynikającej z rodzaju naturalnych warstw gruntowych. Projekt będzie wymagał przystosowania dla osób przechodzących wykopem, odpowiedniego podłoża o zaawansowanych parametrach higroskopijnych w połączeniu z systemem drenarskim wzdłuż linii wykopu, tak aby niezależnie od pory roku, ale szczególnie w okresie deszczowym, zapewnić odpowiednią przepiękliwość podłoża. Może okazać się niezbędne zastosowanie odpowiedniego systemu odsączającego za pomocą pomp drenarskich, które będą rozprowadzać nadmiar wody po przylegającym obszarze. Odpowiedni sposób odwodnienia zapewni właściwy poziom bezpieczeństwa dla użytkowników, szczególnie w okresie zimowym zminimalizuje ryzyko poślizgu w obszarze komunikacyjnym.

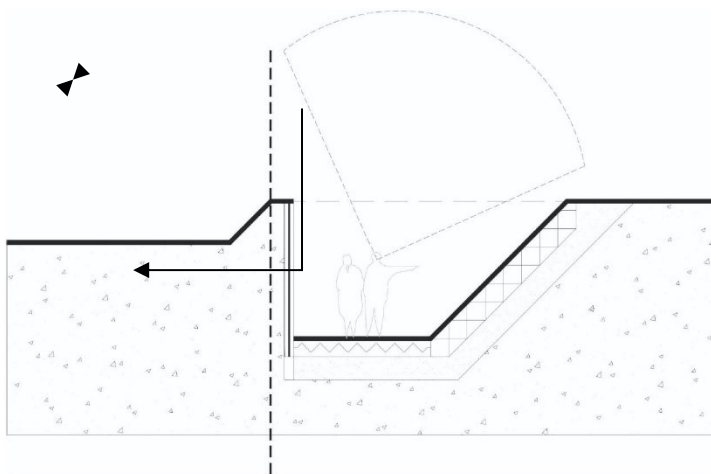
## 10.3. Umocnienia skarp

Niezbędna na etapie wykonywania prac projektowych i realizacyjnych będzie współpraca z konstruktorami, którzy na podstawie wcześniejszych badań gruntowych, nośności, stabilności i frakcji warstw glebowych będą mogli w uzgodnieniu z architektami, zaproponować odpowiednie rozwiązania techniczne, zapewniające

stabilność ścian wykopu oraz wytrzymałość nośną ze względu na parcie otaczającego wykop gruntu.

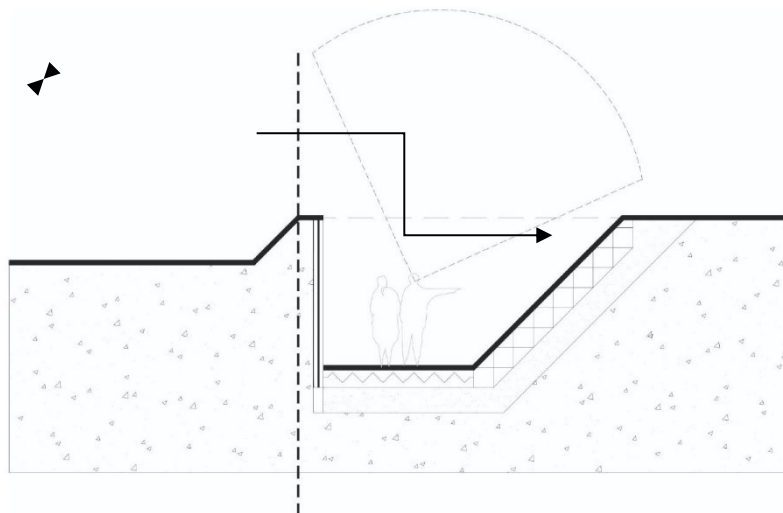
Dobra stabilizacja dla napierających, zewnętrznych warstw ziemi, jest równie ważną kwestią w projekcie. Jednym z zaproponowanych przez architektów rozwiązań jest zastosowanie stalowych ścian oporowych, tzw. ścianek Larsena, które zostaną umocowane w gruncie dookoła zewnętrznej krawędzi okręgu [33]. To pozwoliłoby na dobrą stabilizację dla napierających zewnętrznych warstw ziemi, będąc jednocześnie murem oporowym. Można również zastosować jako mur oporowy rozwiązanie ściany żelbetowej, jednak mając na uwadze koszty realizacji, czas oraz aspekt maksymalnej ochrony zastanej przyrody, rozwiązanie z zastosowaniem metalowych „ścianek Larsena” wydaje się optymalne, chociażby pod względem łatwego ewentualnego recyklingu użytych materiałów.

Przeciwną powierzchnię skarpy zaproponowano jako rozwiązanie pochylonych płaszczyzn umocnionych częściowymi odcinkami palisad drewniano–stalowych w układach kaskadowych, wykończonych gazonami betonowymi z zielenią zimozieloną typu irga lub tzw. ogródki skalne z odpowiednim typem nasadzeń. Zapewni to bezpieczeństwo użytkowania, a jednocześnie poszerzy tzw. światło przekroju wykopu komunikacyjnego (rys. 4). W płaszczyznach powierzchni skalniaków można zastosować elementy siedzisk z materiałów naturalnych jak gązdy lub drewno (rys. 5).



**Rys. 4.** Ścianka Larsena – przekrój schematyczny

*Źródło: opracowanie własne, P. Białas.*



**Rys. 5.** Skalniak: przekrój schematyczny

*Źródło: opracowanie własne, P. Białas.*

#### 10.4. Posadzka

Zakłada się, że posadzka będzie wykonana z materiałów naturalnych, rodzimych, jak płyty kamienne, gres lub żwir, o frakcji zapewniającej wygodę i bezpieczeństwo poruszania się użytkowników, w tym i osób niepełnosprawnych na wózkach. Zgodnie z założeniami projektu „wykop” będzie formą pochylni o długości od 150 m do około 300 m, o spadku nachylenia w okolicach 1,6–3,2%, przy zagłębieniu maksymalnie do 2,5–3,0 m, więc zapewniający wygodę poruszania się bez konieczności stosowania spoczników pośrednich i elementów pochwytów. Kąt nachylenia płaszczyzny pochylni nie będzie wymagał zastosowania stopni schodowych w jej przestrzeni, co ułatwi poruszanie się osób niepełnosprawnych o kulach lub na wózkach inwalidzkich. Ze względu na konieczność skutecznego odwodnienia powierzchni posadzki pochylni, zostaną zastosowane odwodnienia liniowe poprzeczne co około 20–30 m oraz korytko odsączające wzdłuż płaszczyzny pionowej „ścianki Larsena”.

#### 10.5. Zabezpieczenie zewnętrzne

W celu zapewnienia bezpieczeństwa użytkownika całego obiektu, ze względu na usytuowanie najniższego punktu „wykopu” na poziomie od 2,5–3,0 m od strefy zerowej wejścia do okręgu, istnieje konieczność zastosowania zabezpieczenia strefy zewnętrznej okręgu poprzez balustradę liniową lub wał, który minimalizowałby możliwość wypadku. Zapewniając wymagania bezpieczeństwa, należy zwrócić uwagę na estetykę rozwiązań. Na powierzchni wału lub balustrady przyjęto elementy ozdobne z zieleni w formie ogródków skalnych.

## 10.6. Realizacja w nurcie ekologicznym

Ważną kwestią jest tożsamość projektu w formie fizycznej z ideą. Land art z zasady korelujący z naturą i podkreślający biologiczną cykliczność – rolę dnia i nocy, powinien być zrealizowany w nurcie proekologicznym. Założenie ma na celu działalność edukacyjną wśród wszystkich osób korzystających z obiektu. Jednym z takich działań proedukacyjnych mogłaby być również metoda realizacji obiektu, polegająca na zorganizowaniu i zaangażowaniu grup wolontaryjnych, których uczestnicy mieliby możliwość pomocy podczas realizacji. W celu zastosowania idei ekologicznych oraz obniżenia kosztów realizacji, planuje się wykorzystanie naturalnych materiałów budowlanych, które będzie można pozyskać lokalnie, zmniejszając tym samym ilość niezbędnego transportu, zastosowania specjalistycznego sprzętu budowlanego, jak i zmniejszając czas wykonania. Zastosowane rozwiązania oraz materiały powinny zminimalizować koszty późniejszego użytkowania.

## 11. Podsumowanie

„Co, jeśli pewnego dnia nie moglibyśmy już zobaczyć zielonych pól i pagórków Walii...amazonkich lasów, szczytów górskich w Nepalu albo wielkich rzek? [...] Właśnie do tego doprowadziliśmy, jeśli chodzi o nocne niebo, zubożając w ten sposób nasze własne życie” [28] – mówi profesor kosmologii Nicholas Campion. Powszechny dostęp do zdjęć satelitarnych i interaktywnych map zanieczyszczenia sztucznym światłem pozwala nam niemalże codziennie obserwować rozwój przysłaniania nieba. Zanikanie ciemności i bagatelizowanie naturalnej jasności, niewątpliwie wpływa na niemalże wszystkie organizmy żywe.

Rozregulowany rytm dobowy niesie za sobą konsekwencje, które być może za niedługo będą nieodwracalne. Skala zjawiska powinna niepokoić, zwłaszcza że obejmuje swoim zasięgiem tak wiele istot. Ptaki są zdezorientowane w trakcie migracji, owady zatracają poczucie czasu, oświetlone sztucznie drzewa starzeją się szybciej, a zaburzony zegar kwiatowy powoduje zmiany w rytmie kwitnienia różnych gatunków roślin. Z pewnością inicjatywy podejmowane by uświadamiać ludzi są wciąż bardzo potrzebne. Miasta powinny brać przykład m.in. ze szkockiej miejscowości Moffat, określanej jako pierwsze europejskie miasto o czystym nocnym niebie, która poprzez wprowadzenie osłon na latarniach ulicznych zmieniła kąt padania światła, niwelując tym samym jego szkodliwą emisję [28]. Zatem przed urbanistami, architektami i projektantami stoi ważne zadanie, dzięki któremu być może uda się przywrócić, we współcześnie odpowiedniej formie, rytm dobowy, pozwalający nam nie tylko w zdrowiu cieszyć się dniem, ale także doceniać ulotność niezwykłego spektaklu, rozgrywającego się na nocnym niebie.



## Literatura

- [1] Czarnecka K., Błażejczyk K., Morita T., *Characteristics of light pollution – A case study of Warsaw (Poland) and Fukuoka (Japan)*, Environmental Pollution, 2021, 291, art. 118113.
- [2] Squires W.A., Hanson H.E., *The destruction of birds at the lighthouses on the coast of California*, Condor, 1918, 20, s. 6–10.
- [3] Turnrose B.E., *Absolute spectral energy distribution of the night sky at Palomar and Mount Wilson observatories*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1974, 86, s. 545.
- [4] Massey P., Gronwall C., Pilachowski C.A., *The spectrum of the Kitt Peak night sky*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1990, 102, s. 1046.
- [5] Cinzano P., Falchi F., Elvidge CD., *The first world atlas of the artificial night sky brightness*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, s. 328, 689–707.
- [6] Hölker F., Wolter Ch., Perki E.K., Tockner K., *Light Pollution as a Biodiversity Threat*, Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(12), 681–682, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- [7] Davies T. W., Bennie J., Inger R., Hempel de Ibarra N., Gaston K.J., *Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions?*, Global Change Biology, 2013, 19, s. 1417–1423.
- [8] Navara K.J., Nelson R.J., *The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences*, Journal of Pineal Research, 2007, 43, s. 215–224.
- [9] Chellappa S.L., Steiner R., Blattner P., Oelhafen P., Götz T., Cajochen Ch., *Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert?*, PLOS One, 2011, 6(1), e16429, DOI: 10.1371/journal.pone.0016429.
- [10] Skwarło-Sońta K., *Skażenie światłem: co dziś wiemy o jego wpływie na funkcjonowanie organizmu człowieka?*, KOSMOS, 2015, 64, 4, s. 633–642.
- [11] Siedlecki B., Czaplicka A., *Wpływ oświetlenia obszarów miejskich na zanieczyszczenie środowiska światłem*, AURA Ochrona Środowiska, 2017, 6, s. 3–5.
- [12] Sala K., *Zanieczyszczenie świetlne. Zagrożenia i sposoby jego ograniczania*, Rocznik Administracji Publicznej, 2020, 6, s. 254–266.
- [13] Mu H., Li X., Du X., Huang J., Su W., Hu T., Wen Y., Yin P., Han Y., Xue F., *Evaluation of Light Pollution in Global Protected Areas from 1992 to 2018*, Remote Sensing, 2021, 13, s. 1849.
- [14] International Dark-Sky Association, <https://www.darksky.org/> (dostęp 29.12.2021).
- [15] Program Ciemne Niebo <https://ciemneniebo.pl/> (dostęp 29.12.2021).
- [16] lightpollutionmap.info, <https://www.lightpollutionmap.info/> (dostęp: 29.12.2021).
- [17] Projekt „Wygasz”, <http://www.wygasz.edu.pl/> (dostęp 29.12.2021).
- [18] Program Globe at Night, <http://globeatnight-network.org/lp-measurement.html> (dostęp: 29.12.2021).
- [19] Light Pollution: The Overuse & Misuse of Artificial Light at Night, James Madison University, <https://www.jmu.edu/planetarium/light-pollution.shtml> (dostęp: 29.12.2021).
- [20] Międzynarodowe Stowarzyszenie Ciemnego Nieba, *Praktyczny przewodnik po zanieczyszczeniu światłem. Tucson, Arizona*, 2011.
- [21] Klinkenborg V., *Our Vanishing NIGHT*, National Geographic Magazine, 2008.

- [22] Program Globe at Night, <https://www.globeatnight.org/light-pollution.php> (dostęp: 29.12.2021).
- [23] Szwed J., *Planowanie i ochrona krajobrazu nocnego – Parki Ciemnego Nieba*, Teka Komisji Architektury Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych, 2013, IX/3, s. 74–83.
- [24] Wilk B., Jarosińska K., Senio J., Michalski R., *Zanieczyszczenie światłem*, LABportal, 2012, <https://www.labportal.pl/article/zanieczyszczenie-swiatlem> (dostęp: 23.03.2022).
- [25] Ścieżor T., (2019), *Aby noc nie przypominała dnia* „Nasza politechnika – miesięcznik Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki”, nr 2(186), ss. 3–9.
- [26] Izerski Park Ciemnego Nieba, <http://www.izera-darksky.eu/index-pl.html> (dostęp: 29.12.2021).
- [27] Park Gwiazdowego Nieba w Bieszczadach, <https://www.gwiazdnebieszczady.pl/> (dostęp: 29.12.2021).
- [28] Geddes L., *W pogoni za słońcem*, Insignis Media, 2019.
- [29] Osmatek T., Gośliński T., *Rozwój badań dotyczących fotodynamicznej terapii onkologicznej*, <https://www.ptfarm.pl/pub/File/Farmacja%20Polska/2009/08-2009/03%20Terapia%20fotodynamiczna.pdf> (dostęp: 20.12.2021).
- [30] Kuczmański M., *Usłonecznienie Polski i jego przydatność dla Helioterapii*, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, 1990.
- [31] Stevenson R. L., *Virginibus Puerisque*, London, 1881.
- [32] Internetowa encyklopedia PWN, hasło: land art, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/land-art;3930366.html> (dostęp: 29.12.2021).
- [33] Materiały dotyczące konstrukcji ścian Larsena; [www.kratapomostowa.blogspot.com](http://www.kratapomostowa.blogspot.com) (dostęp: 29.12.2021).

## LIGHT AND DARKNESS – THE EPHEMERAL ART OF THE EARTH

**Abstract:** Artificial light pollution is an increasingly noticeable problem in the modern world. Thanks to advanced technology, we turn night into day every day, regardless of the precious influence of natural light, darkness and circadian rhythm on the quality of life of almost all living organisms. The article presents examples of the impact of this phenomenon on the natural environment and human, the scale of its impact and the expansion rate. It also puts forward the subject of the main sources of artificial lighting that drown out the night landscape and exemplifies contemporary attempts to reduce the negative effects of pollution with artificial light. It describes foreign forms of protection of natural dark skies and examples of initiatives undertaken in Poland. On the basis of the competition, conceptual project of land art located in the Izera Dark-Sky Park, methods of searching for correlation between the described phenomena and architectural and spatial solutions were presented.

**Keywords:** darkness, light, circadian rhythm, night, light pollution



# ROLA ŚWIATŁA W FUNKCJONOWANIU MIASTA

## Zofia Czaplicka

Wydział Architektury, Politechnika Krakowska  
*zofia.czaplicka@student.pk.edu.pl*

Wydział Filozoficzny, Uniwersytet Jagielloński  
*zofia.czaplicka@student.uj.edu.pl*

## Anna Czaplicka

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska  
*anna.czaplicka@pk.edu.pl*

**Streszczenie:** Architektura definiowana jako gra brył w świetle staje się tworem transcendentnym, podlegającym nieustannym zmianom, wykracza poza swoją z góry zdefiniowaną formę, tworząc nieskończone możliwości odczytywania jej na nowo. Światło wpływa na postrzeganie przestrzeni miejskiej, nasze samopoczucie, poczucie bezpieczeństwa, klimat oraz kontekst danego otoczenia.

Najpierw zostanie przedstawiona rola światła w historii kształtowania się miast na przestrzeni wieków z perspektywy urbanistycznej. Następnie omówiona zostanie rola światła we współczesnych miastach. Ma ono znaczenie dla funkcjonowania tkanki miejskiej; rozpoczynając od rytmu życia mieszkańców po wszelkie oryginalne przejawy kreatywności i wykorzystywania zastanego środowiska do tworzenia wystąpień o charakterze performatywnym. Projektując strukturę urbanistyczną, nie możemy kierować się jedynie aspektami ważnymi dla człowieka, ponieważ czynniki naturalne w znacznym stopniu wpływają na postrzeganie przestrzeni. Względy środowiskowe, wspólne naszemu organizmowi oraz florze i faunie, skonfrontowane ze zrównoważonym projektowaniem, nie dają nam jednoznacznego rozwiązania, jak powinniśmy kształtować oświetlenie miejskie. Pod koniec zostanie podjęta refleksja, z perspektywy architektonicznej, jakie rozwiązania byłyby właściwe w kontekstach istotnych dla tematu perspektyw – środowiskowej, urbanistycznej oraz filozoficznej.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, architektura, performatyka, miasto, filozofia przestrzeni

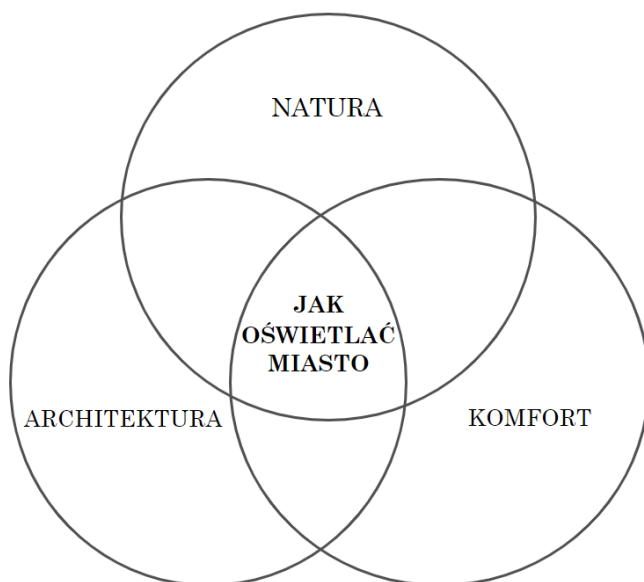
## 1. Wstęp

Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi, jaką rolę światło odgrywa w funkcjonowaniu miasta. Architektura definiowana jako gra brył w świetle [1] staje się tworem transcendentalnym, podlegającym nieustannym zmianom, wykracza poza swoją z góry zdefiniowaną formę, tworząc nieskończone możliwości odczytywania jej na nowo. Światło wpływa na postrzeganie przestrzeni, w której żyjemy, nasze samopoczucie, poczucie bezpieczeństwa, klimat w znaczeniu atmosfery, sytuacji danego otoczenia. W tym celu byłoby wskazane zacząć od krótkiego przedstawienia roli światła w historii kształtowania się miast na przestrzeni wieków z perspektywy urbanistycznej, a następnie przybliżyć kwestię roli światła we współczesnych miastach. Mają one znaczenie dla szeroko rozumianej performatyki; rozpoczynając od rytmu życia mieszkańców po wszelkie oryginalne przejawy kreatywności i wykorzystywania zastanego środowiska do tworzenia wystąpień o charakterze performatywnym. W pracy zostanie zaakcentowana kwestia, że nie jest wskazane, żebyśmy kierowali się jedynie aspektami ważnymi dla poczucia bezpieczeństwa człowieka w przestrzeni publicznej. Powstaje napięcie pomiędzy naszymi odczuciami a czynnikami środowiskowymi wspólnymi naszemu organizmowi oraz florze i faunie (rys. 1). Ta wielowątkowość kwestii różnych perspektyw związanych z postrzeganiem potrzeby emisji światła nie daje nam jednoznacznego rozwiązania, jak powinniśmy kształtować oświetlenie. Pod koniec zostanie podjęta refleksja z perspektywy architektonicznej, jakie rozwiązania byłyby właściwe w kontekście uprzednio rozważanych punktów widzenia.

Światło zyskało wiele uwagi jako czynnik definiujący i determinujący odbiór architektury. Le Corbusier wskazuje je jako jeden z trzech najistotniejszych elementów wpływających na odbiór architektury („Przestrzeń, światło porządek – te rzeczy są tak potrzebne człowiekowi, jak chleb oraz miejsce do spania”). Współcześnie wykazuje się istotne powiązania między światłem słonecznym oraz sztucznym a architektonicznym. Światło słoneczne dostarcza energię, sztuczne – podkreśla walory estetyczno-przestrzenne, a architektoniczne zmienia funkcje użytkowe. Tadao Ando, wybitny współczesny architekt, obszernie wyjaśnia rolę, jaką odgrywa światło w jego projektach, jako jeden z ważniejszych czynników stanowiących jedność między domem a naturą. Podkreśla on rolę światła w swoich pracach, o czym świadczy fragment jego eseju, opublikowanego po zdobyciu nagrody Pritzкера w 1995 roku: „Takie rzeczy, jak światło i wiatr mają znaczenie tylko wtedy, gdy są wprowadzone do wnętrza domu w formie odciętej od świata zewnętrznego. Odizolowane fragmenty światła i powietrza sugerują cały świat przyrody. Formy, które stworzyłem, zmieniły się i nabrały znaczenia dzięki elementarnej naturze (światło i powietrze), które wskazują na upływ czasu i zmiany pór roku...” [2].

W pierwszej części prezentowanego artykułu podjęte zostaną kwestie odnoszące się do urbanistyki i roli światła w mieście. Druga część ma za zadanie wyjaśnienie wpływu filozofii architektury japońskiej na ukształtowanie się myślenia o zmienności światła w strukturze miasta. Następnie podjęta zostanie kwestia poczucia

bezpieczeństwa w mieście uwarunkowana przez oświetlenie. Kolejny podrozdział ma wskazać powiązania pomiędzy charakterem oświetlenia a zjawiskami naturalnymi, takimi jak tryb funkcjonowania człowieka oraz zwierząt w środowisku miejskim. Ostatnia część poruszy wątki związane z performatywną rolą światła, tworząc z niego grę na poziomie wykraczającym poza architekturę i wykazując powiązania między fizycznością a psychicznym odbiorem miasta (rys. 1).



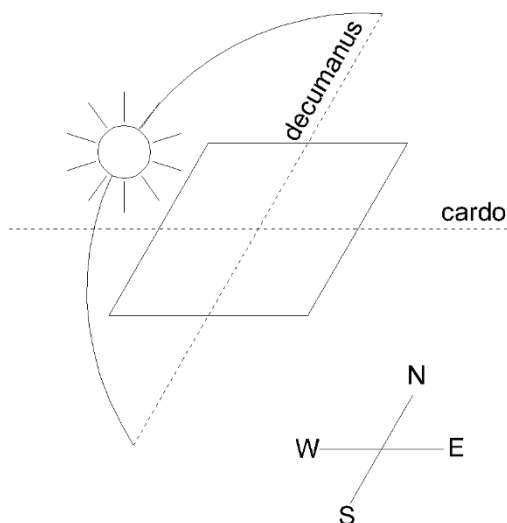
Rys. 1. Graf ilustrujący wieloaspektowość problemu oświetlenia tkanki miejskiej

Źródło: autor Zofia Czaplicka.

## 2. Urbanistyka a światło

Nasze miasta wyrosły z filozofii greckiego *poleis* [3]. Istniał w nich wyraźny podział między przestrzenią indywidualną – mieszkalną, strefą społeczno-socjalną z agorą i częścią podmiejską, gdzie znajdowały się ogrody, gimnazjony, miejsca do ćwiczeń i doskonalenia własnych umiejętności fizycznych. Miasta greckie zakładane na planach organicznych były projektowane w miejscach gwarantujących bezpieczeństwo, zwykle w okolicy wzgórza, gdzie wznoszono świątynie, aby bogowie czuwali nad miastem. Pozwalało to odgraniczyć sfery miasta przyjmowane w urbanistyce za starożytnym architektem Hippodamosem z Miletu, który jako pierwszy dokonał podziału miasta na miasto bogów – władzy – ludzi. Jednak rytm wydarzeń w *poleis* wyznaczały wschody i zachody słońca, dysputy filozoficzne toczyły się przy świetle dnia na agorze, a żeby znaleźć mądrego Ateńczyka, Diogenes z Synopy musiał przemierzać *poleis* ze świecą.

Gdy Rzymianie zakładali swoje miasta na planie obozów, najważniejsze było odpowiednie umiejscowienie względem stron świata, zaprojektowanie doskonale prostopadłych ulic (*decumanus* wyznaczające kierunek między wschodem a zachodem oraz *cardo* orientujące północ i południe – rys. 2), w celu lepszej organizacji obozu. Do dziś jesteśmy w stanie określić dzienną datę powstania obozów rzymskich, na których wyrosły współczesne miasta z powodu dokładnych metod orientowania miasta w kierunkach wschód–zachód [4].



**Rys. 2.** Usytuowanie dróg *cardo* oraz *decumanus* w starożytnym obozie rzymskim

*Źródło: autor Zofia Czaplicka.*

W miastach lokowanych na planie magdeburskim, lubeckim, flamandzkim i innych charakterystycznych dla epoki średniowiecza, plan urbanistyczny skupiał się na odmiennych aspektach, związanych raczej z sytuacją finansową niż światłem. Owe plany przewidywały zwielokrotnienie korzyści płynących z handlowych aspektów głównej ulicy, pomijając zagadnienia związane z właściwym oświetleniem. Późniejsze miasta renesansowe miały za zadanie tworzyć przestrzenie reprezentacyjne, gdzie światło zyskało rolę eksponowania fasad i stało się narzędziem estetyzacji środowiska miejskiego. Większą rolę zyskało światło na początku XIX wieku, kiedy pojawiły się użytkowane na szeroką skalę lampy łukowe. Stały się one dogodnym narzędziem wydłużającym rytm dobowy [5].

Powyższe układy stanowią podłoże do współczesnych przestrzeni miejskich. Na bazie tych układów, które przetrwały do XX wieku, rozrastając się i kształtując w zależności od warunków klimatycznych, ekonomicznych i społecznych, wyrosły

dzisiejsze miasta. Niemniej dzisiejsza urbanistyka mierzy się z nowymi problemami. „Pomimo rosnącej urbanizacji, nie wykorzystujemy w pełni potencjału naszych miast i miasteczek. Gdy sklepy i biura są zamykane, spada poziom aktywności w centrach miast. Pora nocna stanowi wyzwanie dla miast na całym świecie, czy to ze względu na bezpieczeństwo i strach, czy też brak przeznaczenia lub atrakcyjności” [6]. Zachodzą tym samym istotne zmiany w postrzeganiu środowiska krajobrazu miast nocą. Aby czerpać inspiracje, jak rozgrywać grę światła w mieście, warto sięgnąć po ciekawe przykłady ze świata. Za przykład mogłoby służyć Toronto, które opracowało w 2013 roku Masterplan Interpretacji Dziedzictwa dla Starego Miasta. Wykorzystano fakt, że światłem można oddać charakter najważniejszych obiektów historycznych i tym samym przekazać tożsamość miasta. Światło podkreśla struktury urbanistyczne i budynki historyczne. Mniej oświetlone części miasta są mniej istotne, funkcjonujące dzięki temu zabiegowi na drugim planie, nie wchodząc w główną sferę wydarzeń, dziejącą się koło historycznego centrum.

Zwiększenie jakości oświetlenia nie zawsze musi stanowić niezmiennie w czasie rozwiązanie. Czasami zjawia się w roli transcendentalnej, pozwalającej doświadczyć zjawiska i nadać znaczenie chwili. Wydarzenia typu pokazy świetlne lub festiwale światła mają zgoła odmienną funkcję – stanowią komercyjną okazję, aby przyciągnąć do siebie ludzi.

Nocne podświetlenie fontanny w pobliżu Placa Catalunia w Barcelonie pozwala nadać charakter temu ważnemu miejscu w mieście, tworząc reprezentatywną przestrzeń, z perspektywą albo na Pałac Sztuki Katalońskiej, albo na całą Barcelonę. Tworzy się w ten sposób przestrzeń dla przedstawienia ważnych miejsc związanych z kulturą katalońską (rys. 3, rys. 4).



**Rys. 3.** Fontanna na Placu Hiszpańskim w Barcelonie

*Źródło: autor Zofia Czaplicka, Anna Czaplicka.*





**Rys. 4.** Fontanna na Placu Hiszpańskim w Barcelonie

*Źródło: autor Zofia Czaplicka, Anna Czaplicka.*

Warunki pogodowe, ideologiczne i kulturowe, uwarunkowania społeczeństwa oraz środki finansowe i intencje zarządców miast zostały określone jako zasadnicze czynniki wpływające na tworzenie kultury oświetlenia, która kształtuje i wizualizuje fazę nocną w miastach [7].

### 3. Metabolizm tkanki miejskiej

Filozofia metaboliczna wyrosła na gruncie zupełnie innego postrzegania przestrzeni w ogóle, w tym przestrzeni miejskiej, niż jest to zakodowane w kulturze Zachodu. Aby zarysować kontekst dla wyłonienia się zupełnie nowej koncepcji miasta warto położyć akcent na nieustanne zmiany dokonujące się w przestrzeni. Inna jest ulica nocą, gdy większość ludzi pozostaje w domach, inna, gdy wszyscy wyjeżdżają w korku do pracy, jej klimat zmienia się w skwarne popołudnie. Rytm naszego życia wyznacza charakter, jaki w danym momencie ma miejsce. Tym samym projektowanie budynków i architektury z natury jest w pewien sposób ułomne w swojej twardej niezmienności. Możemy próbować redukować owo odczucie zmieniając oświetlenie, a co za tym idzie – charakter danej przestrzeni, jak to ma miejsce w przedstawionym poniżej berlińskim Sony Center (rys. 5).



**Rys. 5.** Sony Center – różne sposoby oświetlenia, architekt Helmut Jahn, Berlin

*Źródło: Light Zone City: Light Planning in the Urban Context  
Autor: Christa van Santen, [dostęp 23.09.2021].*

Kultura europejska, zakochana w monumentalnych, trwałych budowlach nie zawsze w pełni rozumiała to zjawisko w przeciwieństwie do dalekiego wschodu. Sekiguchi używa na określenie japońskiej kultury metafory „ameby”. Japońska kultura jest „amebowa” w tym sensie, że tak jak to morskie stworzenie jest „organizmem niezwykle prostym i plastycznym, transparentnym tworem zmieniającym swoją formę” [8].

Japończycy bardzo szeroko czerpali z obcych kultur, wykorzystując wpływy, które do nich docierały w błyskawicznym tempie z wzorcową skutecznością [8]. W estetyce japońskiej wielką wagę przywiązuje się do przestrzeni pustych, nie jako miejsc, gdzie mogłoby potencjalnie coś powstać a przestrzeni otwartych, samych w sobie, wyrażających w pełni relacje istniejące w przestrzeni. Zobrazowaniem takiego myślenia o przestrzeni byłaby engawa (rys. 6) – drewniany pomost znajdujący się pomiędzy ogrodem a domem, obok drzwi deszczowych. Drzwi te możemy czasem otworzyć, czyniąc engawę częścią przestrzeni domowej lub zamknąć uwypuklając jej funkcjonowanie w części ogrodowej.



**Rys. 6.** Engawa

*Źródło: [http://space-aya.blogspot.com/2013/05/blog-post\\_17.html](http://space-aya.blogspot.com/2013/05/blog-post_17.html) (dostęp 31.12.2021).*

Tymczasem architekci aż do czasów metabolizmu niezwykle rzadko szukali rozwiązań pozwalających budowli zarówno w aspektach wewnętrznych, jak i zewnętrznych, dostosować się do stałej zmienności. Sam ruch metabolizmu powstał po wzroście gospodarczym w zrujnowanej jeszcze po wojnie Japonii w latach 60. XX w. W obliczu konieczności zbudowania na nowo wielu miejsc istotnych w miastach zaczęły powstawać pomysły megastruktur ze stałym trzonem konstrukcyjnym i wymiennymi elementami addytywnymi. Tak samo zmienne ustawienie sprzętów, dostosowywanie oświetlenia w rytmie godzinowym pozwala dostosować wnętrze do potrzeb użytkowników.

#### 4. Bezpieczeństwo

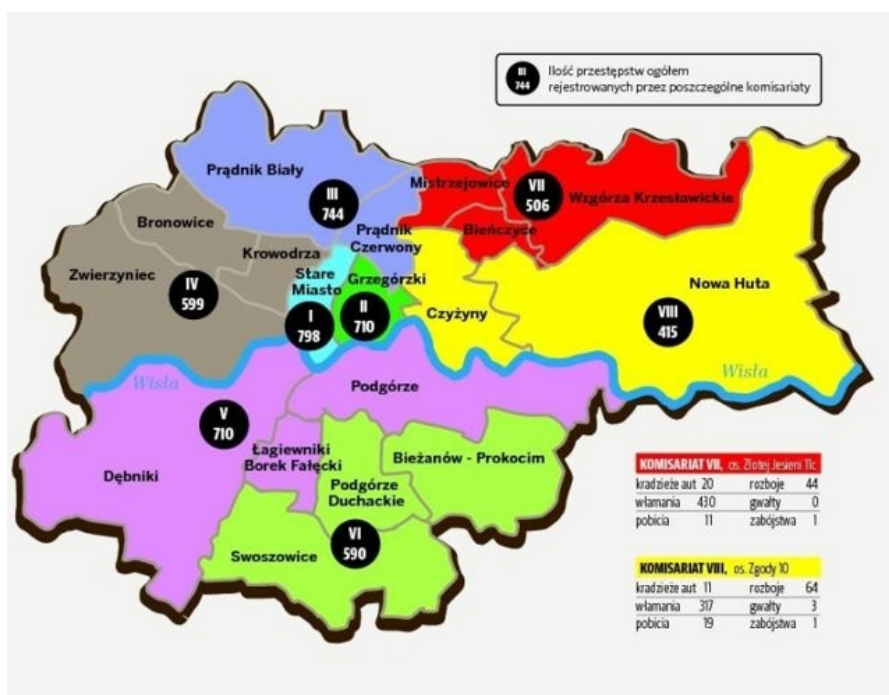
Nikt do tej pory nie wymyślił rozwiązania jak sprawić, aby miasto nocą było tak samo przyjazne i bezpieczne jak miasto w ciągu dnia. Krokiem prowadzącym do zwiększenia bezpieczeństwa użytkownika może być inteligentne oświetlenie. System ten składa się z zamontowanych na latarniach sieci czujników ruchu oraz kamer analizujących obrazy. Czujniki ruchu rozpoznają poruszające się obiekty. W miejscach, gdzie poruszają się samochody, rowerzyści lub przechodnie natężenie światła wzrasta do 80–100%. Jeśli system rozpozna zwierzęta lub ruchy drzew, natężenie światła pozostaje na optymalnym poziomie 5–30%. Regulując intensywność oświetlenia w podanym przedziale procentowym, dostosowuje się oświetlenie w godzinach nocnych stosując mniejsze lub większe przyciemnianie. Intensywność światła zależy również od warunków pogodowych, ilości poruszających się obiektów oraz dostępności światła dziennego w porze wieczornej danej pory roku. Tak wykorzystane oświetlenie sprzyja poczuciu bezpieczeństwa poruszających się osób, a zarazem jest energooszczędne [9].

Na uwagę zasługują badania Wilson i Kelling, którzy opracowali teorię rozbitych okien [10]. Wskazuje ona, że istnieje połączenie między stanem fizycznym i psychiczno-socjologiczno-społecznym dzielnicy. Im bardziej zaniedbane jest miejsce, tym ludzie mniej przykładają starań i uwagi, aby o nie zadbać. W związku z tą teorią naukowcy z Uniwersytetu w Eindhoven badają zastosowanie interaktywnego oświetlenia w celu „deeskalacji agresji” i zachowań antyspołecznych. Różne możliwości oświetlenia i scenariusze przedstawienia ich w mieście są stwarzane w celu doprecyzowania potencjalnego odbioru i kształtowania przez to zjawisk społecznych. Czynniki, takie jak kolory, intensywność i dynamika interaktywnego oświetlenia mają moc zmiany nastrojów społecznych na danym obszarze.

Badania wykazały, że oświetlenie może wywoływać pozytywne zachowania – na przykład poprzez obniżenie poziomu pobudzenia, przesuwanie i poszerzanie uwagi lub wywoływanie pozytywnego zrównoważonego nastroju. Wyniki tych badań są testowane i w wypadku pozytywnych przewidywań – wcielane w życie. W ich wyniku powstają strategie, jak poprawnie oświetlać miasto, unikając działań odbiegających od norm społecznych oraz potencjalnie niebezpiecznych, budzących poczucie dyskomfortu i strachu.

Dla rozwoju i komfortu życia kluczem jest poczucie bezpieczeństwa w miejscu zamieszkania. Do wyzwań stojących przed urbanistami należy dostosowanie przestrzeni do społecznych potrzeb, minimalizowanie miejsc stwarzających zagrożenie zachowaniami budzącymi strach i/lub niebezpiecznymi. Jednym z tych wyzwań jest wpływ oświetlenia drogi i obszarów przydrożnych na zachowanie kierowców oraz pieszych. Ważnym aspektem dbania o bezpieczeństwo byłoby usunięcie, emitujących zbyt mocne światło, bilbordów. Stanowią one przyczynę licznych wypadków, ponieważ oślepiają uczestników ruchu drogowego, uniemożliwiając bezpieczne zachowanie.

Ponadto w podejmowanych kwestiach bezpieczeństwa w środowisku miejskim aż nader istotna jest opinia kobiet, które według licznych danych zmagają się z większą ilością lęków związanych z przestrzenią miejską. Kobiety identyfikują miasta nocą i nieznanymi na ulicy jako największe źródło lęku [11]. Strach ten zatrzymuje kobiety w domach umacniając heteropatriarchalny kapitalistyczny system, w którym kobiety są przywiązane do przestrzeni prywatnych. Lęk skupia się wokół ciemnych ulic, stacji metra, ciemnych chodników. Wpływa to na dynamicznie zmieniającą się mapę bezpieczeństwa i strachu miasta [11]. Poniżej zaprezentowano mapę strachu miasta Krakowa (rys. 7).



Rys. 7. Mapa strachu miasta Krakowa

Źródło: <https://krakow.naszemiasto.pl/krakow-oto-najniebezpieczniejsze-miejsca-w-miescie/ar/c3-2158611>, (dostęp: 23.09.2021).

Zapewne to zjawisko ma korzenie w braku projektowania miast historycznie przez kobiety. Pierwsze urbanistki/architektki pojawiają się w historii dopiero na przełomie XVIII i XIX wieku [12] zmagając się, tak naprawdę do dziś, z dyskryminacją i niedopuszczaniem do największych projektów, ze względu na słabość i wrażliwość kojarzonych z płcią. Pierwsze kobiety zajmujące się architekturą były przedstawiane jako hermafrodytyczne twory, dewiantki seksualne lub homoseksualistki [13]. Takie nastroje społeczne utrudniały ich wkład w konstrukcję miast, aby były one postrzegane jako bezpieczne również przez kobiety.

Do dziś mieszkanki miast unikają pewnych miejsc, starają się być pod telefonem, nie chodzą po parkach nocą, codzienne rutyny są spowodowane ciągłą obawą o bezpieczeństwo [13]. Dbają, aby znajomi wysyłali im wiadomość, gdy dotrą do domu. Lęk jest współistotną częścią funkcjonowania i życia w środowisku miejskim. Stanowi to podłoże do refleksji, jakie powiązania stanowią relację światła oraz zjawisk społecznych wyrażonych, m.in. w myśli: „Tradycyjna koncepcja zrównoważonego oświetlenia miejskiego opiera się jedynie na aspektach ekonomicznych i środowiskowo-technicznych. Ponieważ oświetlenie jest przede wszystkim przeznaczone dla ludzi, oświetlenie miejskie powinno skupiać się na doświadczeniach ludzkich, odgrywając rolę jakościowego zaangażowania społecznego” [13].

Paradoksalnie, kobiety często traktują przestrzeń publiczną – ulice, place – jako przestrzeń „prywatną”, ponieważ w tych miejscach mogą pozostać anonimowe bez krytycznego, przywołującego do porządku wzroku rodziców, nauczycieli i innych troszczących się o nie [14]. Jest to przestrzeń gdzie posiadają wolność niespotykaną nigdzie indziej. Niemniej niesie to ze sobą konieczność uważności i ostrożności.

Przykładowymi zabiegami dbania o bezpieczeństwo byłoby wzmocnienie oświetlenia, lepsze skomunikowanie miasta – zainstalowanie budek telefonicznych, przycisków przywołujących obsługę na parkingach, w garażach, parkach, kampusach uniwersyteckich [14]. Działania te byłyby najbardziej adekwatne z punktu widzenia dbania o bezpieczeństwo.

## 5. Wpływ zanieczyszczenia światłem na organizmy żywe

Projektując miasta trzeba wyważyć pomiędzy bezpieczeństwem poruszających się ludzi a nadmierną emisją światła w przestrzeń, która powoduje zanieczyszczenie świetlne, emisję zanieczyszczeń do atmosfery (podstawowym źródłem energii wykorzystywanym w Polsce jest węgiel), zmiany klimatyczne i generuje większe nakłady finansowe związane z opłatami za energię. Zanieczyszczenie światłem stanowi zagrożenie dla świata istot żywych. Jest emitowane w największej mierze przez tkankę miejską na skutek nieprawidłowej iluminacji obiektów i ciągów komunikacyjnych. Nadmierne, skierowane ku górze, światło może być rozpraszane na aerozolu i/lub pyłach obecnych w atmosferze i odbijane od chmur powodując zanieczyszczenie światłem odległych od miast terenów [15]. Obecnie zanieczyszczenie światłem znajduje się na liście szesnastu największych zagrożeń dla środowiska

[16]. Oświetlenie zużywa około 19% energii wykorzystywanej w domach [17]. Zadaniem jego jest tworzenie nastroju, wpływ na poczucie bezpieczeństwa, dostosowanie rytmu dobowego do indywidualnych wymagań użytkowników.

Zanieczyszczenie światłem ma liczne negatywne efekty. Między innymi prowadzi do zmiany naturalnego zegara biologicznego. Powszechnie wiadomo, że światło w rytmie dobowym (dzień/noc) reguluje funkcje życiowe świata istot żywych. Organizmy żywe zamieszkujące Ziemię musiały wykształcić w procesie ewolucji wewnętrzny zegar biologiczny, zdolny do przewidywania cykliczności dnia i nocy oraz dostosowania do niego własnej fizjologii. Zaburzenia funkcjonowania zegara biologicznego są zazwyczaj konsekwencją czynników zewnętrznych, takich jak narażenie na zbyt dużą ilość światła w porze nocnej, co ma niekorzystny wpływ na ludzi, faunę i florę.

Ekspozycja na sztuczne światło w porze nocnej wpływa negatywnie na prawidłowe funkcjonowanie organizmu ludzkiego, w tym na komfort snu. Problemem dla utrzymania prawidłowych warunków snu jest nie tylko wieczorne oświetlanie pomieszczeń, ale dodatkowo korzystanie w nich ze źródeł sztucznego światła, takich jak ekrany telewizorów, monitory komputerów, tabletów, a nawet smartfonów [18]. Jedną z przyczyn zaburzeń snu jest zmniejszona ilość wytwarzanej w szyszynce melatoniny, wydzielanej do krwiobiegu wyłącznie w ciemności i związane z tym zaburzenia rytmu dobowego, zwiększona produkcja hormonów, takich jak kortyzol, testosteron i estrogeny, oraz zaburzone funkcjonowanie układu odpornościowego [19, 20]. Skutkami tych zakłóceń są przede wszystkim zaburzenia snu, ponadto: choroby układu krwionośnego, zaburzenia metabolizmu determinujące pojawienie się chorób, takich jak otyłość i cukrzyca, depresja oraz zwiększone ryzyko raka piersi i prostaty [21, 22, 23].

Biologiczna reakcja na sztuczne oświetlenie jest uzależniona od rozkładu widmowego światła, ilości pochłoniętego promieniowania oraz czasu i częstotliwości ekspozycji. Badania wykazały, że źródła światła, np. diody LED, o dużej zawartości niebieskiego światła w widmie ich promieniowania w sposób bezpośredni oddziałują na organizm człowieka, hamując produkcję melatoniny [24].

Supresyjne działanie nocnego oświetlenia na wytwarzanie melatoniny wzmaga się nie tylko wraz ze wzrostem jego natężenia, ale również przy wykorzystaniu światła niebieskiego lub polichromatycznego o znacznym natężeniu w zakresie długości fal od 440 do 480 nm [18, 25, 26]. Nocne oświetlenie terenów miejskich wpływa nie tylko na ssaki w tym na człowieka, ale również na ptaki – zaburzając ich sen, powodując zmiany w behawiorze, sezonie rozrodczym, zaburzając ich wędrówki [27]. Po nocy spędzonej w oświetlonym gnieździe ptaki śpią mniej oraz opuszczają swoje gniazda wcześniej rano. Ponadto wiele ptaków ginie w miastach zderzając się z oświetlonymi wysokimi budynkami. Okazjonalnym typem oświetlenia miast, groźnym dla wlatujących w jego obręb ptaków i owadów, są przestrzenne struktury świetlne, łączące w sobie iluminację artystyczną i sztukę [28]. Ptaki i owady uwięzione w snopach światła krążą w ich obrębie do utraty sił. Natomiast narażone na nadmierne oświetlenie nocą rośliny cechuje zmniejszenie plonów w efekcie zaburzenia ich rozwoju, kwitnięcia i dojrzewania. Ponadto rośliny narażone na oświetlenie nocą są słabsze i bardziej podatne na infekcje [28].

## 6. Performens a światło

Sytuacja, w jakiej się znaleźliśmy podczas pandemii, gdy władze miast w wyniku zmniejszonej aktywności użytkowników w ruchu drogowym zdecydowały się na ograniczenie wydatków energetycznych poprzez wyłączenie oświetlenia w godzinach pomiędzy 24:00 a 5:00, zmieniła naszą perspektywę na funkcjonowanie miasta. Zupełnie bez przygotowania została przed nami postawiona nowa dla historii urbanistyki wizja miasta bez życia. A życie i światło są kwestiami splatającymi się zarówno w dziedzinach nauk społecznych, jak i nauk przyrodniczych. W wyniku takiej sytuacji zostaliśmy zmuszeni do zastanowienia się, czy w ogóle możemy powiedzieć o funkcjonowaniu miasta bez światła? Czy jakiegokolwiek życie może tętnić w okolicznościach strachu i braku poczucia bezpieczeństwa? Brak jasnych ulic zanegował istnienie ciemnych zaułków. Rozmył się naturalny kontrast na miejsca bezpieczne i unikane, prawie zanikły undergroundowe wydarzenia, a w sytuacji lockdownu wszelkie dyscypliny performatywne przeniosły się z terenów okalających centrum miasta do rejonów podmiejskich. W typowych miejscach, przeznaczonych dla sportów performatywnych, bądź wybranych przez krakowskie środowiska skateboardowe/parkourowe nikt się nie spotykał ze względu na wzmożony nadzór policji. Jednak wydarzenia te nie przestały się odbywać, zaczęły tylko poszukiwać innych okoliczności zaistnienia niż dotychczas.

Jednak z drugiej strony warto zaznaczyć, że światło nie zawsze jest sprzymierzeńcem performatyki. Szeroko pojęty street art nie powstaje przy najlepiej oświetlanych ulicach miasta. Właśnie szare, monotonne w swym obrazie części miasta, długie i puste mury tworzą idealną okoliczność, aby miejsca, w których plan architektoniczny nie dostarczył danej lokalizacji wystarczających walorów estetycznych, by wypełnić tę pustkę twórczością mieszkańców miasta. Wlepy i graffiti powstają najczęściej właśnie w miejscach zaniedbanych, nudnych estetycznie, wymagających wprost zaangażowania i wprowadzenia w monotony krajobraz indywidualnej części twórczości lokalnego artysty.

Graffiti pojawiają się w momencie kryzysu i stanowią przejaw buntu całego społeczeństwa wobec danej sytuacji [29]. Sytuacji rozumianej zarówno holistycznie, jako kondycja ekonomiczno-gospodarcza kraju oraz punktowo, jako wrazeniowo-estetyczny bunt przeciwko nieodpowiadającemu wizualnie otoczeniu miejskiemu.

Sama estetyka tkanki miejskiej jest nieodłącznym elementem funkcjonowania współczesnego miasta. Miasta obecnie podlegają redefinicji przez wielość zjawisk o charakterze performatywnym; interaktywna struktura przeobraża się w procesie przedefiniowania funkcji i dookreśla aktywność mieszkańców [30].

## 7. Podsumowanie

Na naszych oczach dokonują się zmiany doświadczenia podmiotu poznającego, materializuje się pojęcie transgresji kulturowej. Zaczynamy inaczej niż dotychczas doświadczać otaczającej nas przestrzeni. „Ze względu na szerokie rozpopularyzowanie mediów społecznościowych i możliwość oglądania odległych miejsc w świecie oraz lepszą niż przed kilkudziesięciu laty sytuację gospodarczą, zaczynamy wyżej cenić estetyzację otaczającego nas świata. Nasza kultura uwrażliwia się na otaczającą nas przestrzeń. Zyskujemy tożsamość estetyczną” [31].

Miasto jest zjawiskiem holistycznym, nie sposób wyabstrahować z jego kontekstu kwestii światła. Nie istnieje również oświetlenie samo w sobie poza kontekstem tego, co i w jaki sposób oświetla. Zatem dywagacje teoretyczne powinny stanowić podłoże do projektowania adekwatnego oświetlenia w konkretnych środowiskach miejskich. Ad rem; posługując się dalej przykładem niektórych rejonów Krakowa, jako miejsc wymagających doświetlenia, niebezpiecznych, gdzie żadna kobieta nie zapuszcza się sama pod osłoną nocy – powinniśmy zadbać o bezpieczeństwo takich miejsc, m.in. doświetlając je. Dodatkowo szereg przestrzeni jest oświetlonych nieprawidłowo, generując zanieczyszczenie światłem. Powinno się zmienić w tych miejscach oświetlenie, aby nie generować światła w przestrzeń, a oświetlać światłem LED-owym (energooszczędnym), o barwach ciepłych przestrzeń, po której się poruszamy (dodatkowo mogłyby być to lampy zapalające się, kiedy wyczują ruch, aby nie oświetlać przestrzeni bez potrzeby).

„Jeżeli celem filozofii jest ochrona, kultywowanie i doskonalenie ludzkiego życia, owo dążenie można rozpatrywać w dwóch równoległych wymiarach: przede wszystkim jako osobistą samorealizację, która wyraża się poprzez pragnienie osiągnięcia stanu jedności i integralności charakteru, wyrażającego się poprzez zachowanie harmonii z samym sobą i otoczeniem” [32]. Ten cytat Richarda Shustermana może być traktowany jako swojego rodzaju credo przyświecające w poszukiwaniu problemów i kwestii, nad którymi można by dyskutować, z którymi mierzy się obserwator miasta i rozwiązań przemyślanych przez projektanta tej przestrzeni. Ponieważ, abyśmy czuli się komfortowo w danej przestrzeni, powinniśmy być jego częścią, mieć poczucie przynależności, ale i doskonalić nasze indywidualne związki z otoczeniem. Fundamentem w takim odnalezieniu się w strukturze jest poczucie bezpieczeństwa i logiczna przejrzysta struktura transportu oraz organizacji tkanki miejskiej. Jednak tym, co konstytuuje nasze bycie w danym miejscu jest relacja z otoczeniem, metabolizm jego dostosowania się do naszego rytmu życia i performatyka wydarzeń odbywających się wokoło nas. Nie sposób jednak pominąć dbałości o środowisko, ponieważ bez niego zanika zdrowe naturalne otoczenie, o które powinniśmy dbać.



## Literatura

- [1] Le Corbusier, *W stronę architektury*, Wyd. Centrum Architektury, Warszawa, 2021
- [2] Ando T., *From Self Enclosed Modern Architecture Towards Universality*, The Japan Architect, 1992, s. 9.
- [3] Wykłady prof. inż. arch. Stożka z przedmiotu Urbanistyka na kierunku Architektura i urbanistyka, WA PK.
- [4] Piganiol A., *Les documents cadastraux de la colonie romaine d'Orange*, vue belge de Philologie et d'Histoire Année 1964, 42–1, s. 133–135.
- [5] Koslofsky C., *Court Culture and Street Lighting in Seventeenth-Century Europe*, Journal of Urban History, 2002, 28(6), s. 743–768. DOI: 10.1177/0096144202028006004
- [6] Schwendinger L., Lam F, Lubekeman Ch., Hargrave J., *Rethinking the Shades of Night*, The London School of Economics and Political Science Cities Alive ARUP, 2015, <https://www.researchgate.net/publication/330531364> (dostęp: 1.05.2022).
- [7] Talebian K., Riza M., *Mashhad, City of Light*, Cities, 2020, 101, art. 102674, DOI: 10.1016/j.cities.2020.102674.
- [8] Petri J., *Estetyczne aspekty japońskiej przestrzeni miejskiej*, Universitas, Kraków, 2011.
- [9] Okoń M., Czernski T., *Oświetlenie profesjonalne*, lightning.pl, 2017, <http://lighting.pl/oswietlenie-profesjonalne/drogi-i-ulice/OSRAM-dla-inteligentnych-miast> (dostęp: 14.04.2022).
- [10] Kelling G., Coles C., *Restoring Order and Reducing Crime in Our Communities*, Fixing Broken Windows, 1982.
- [11] Kern L., *Feminist city*, Between the lines, Toronto, 2019.
- [12] Stratigakos D., *Gdzie są architektki?*, Wyd. Centrum Architektury, Warszawa, 2020.
- [13] Scheffler K., *Die frau und die kunst*, Getty Research Institute J. Bard, Berlin, 1900.
- [14] Casciani D., Rosso M., *Experience of Lighting Sustainability in the Environment*, [w:] *Cumulus Helsinki Conference*, Finland, Helsinki 2012, [https://www.researchgate.net/publication/308948048\\_ELSE\\_Experience\\_of\\_Lighting\\_Sustainability\\_in\\_the\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/308948048_ELSE_Experience_of_Lighting_Sustainability_in_the_Environment) (dostęp: 1.05.2022).
- [15] Valentine G., *Children Should Be Seen and Not Heard; The production and Transgression of Adults Public Space*, Urban Geography, 1996, 17, s. 205–220, DOI: 10.2747/0272-3638.17.3.205.
- [16] Kyba C.C.M., Ruhtz T., Fischer J., Hölker F., *Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems*, PLoS ONE, 2011, 6(3), e17307, DOI: 10.1371/journal.pone.0017307.
- [17] Hölker F., Perkin E.K., Tockner K., Wolter Ch., *Light pollution as biodiversity threat*, Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(12):681–2, DOI: 10.1016/j.tree.2010.09.007.
- [18] Sowa J. (red.), *Budynki o niemal zerowym zużyciu energii, pod redakcją*, Wyd. Wydziału Instalacji Budowlanych Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2017.
- [19] Orzeł-Gryglaszewska J., *Zaburzenia snu związane z nadmierną ekspozycją na światło*, Polish Journal of Sustainable Development, 2017, 21(2), s. 91–100.
- [20] Janosik E., *Pozytywne i negatywne aspekty oddziaływania światła na człowieka*, Kosmos, 2015, 64, 4 (309), s. 617–623.
- [21] Jurkowlanec E., *Zaburzenia rytmów biologicznych pod wpływem zanieczyszczenia światłem – wybrane fizjologiczne aspekty niedoboru melatoniny oraz witaminy D*, Polish Journal for Sustainable Development, 2017, 21 (2), s. 47–57.

- [22] Skwarło-Sońta K., *Skażenie światłem: co dziś wiemy o jego wpływie na funkcjonowanie organizmu człowieka?*, Kosmos, 2015, 64, 4, s. 633–642.
- [23] Kostecka J., *Zanieczyszczenie sztucznym światłem a świadczenie ekosystemów i zdrowie człowieka*, Polish Journal for Sustainable Development, 2017, 21 (2), s. 59–69.
- [24] Kucharczyk M., Gąsak I., *Ekologiczne efekty zanieczyszczenia światłem* [w:] *III Międzynarodowa Konferencja Naukowo–Techniczna TRANSEIA „Oceny oddziaływania na środowisko w budownictwie komunikacyjnym*, 2017, <http://www.transeia.eu/konf-transeia/uploads/2018/01/s3r1.pdf> (dostęp: 22.02.2020).
- [25] Tabaka P., Fryc I., *Wpływ rozkładu widmowego lamp LED, stosowanych w oświetleniu terenów zewnętrznych, na widzialność gwiazd, hamowanie wydzielania melatoniny oraz efektywność fitochromu*, [w:] *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, Warszawa, Centrum Badań Kosmicznych PAN, 2019, s. 3.
- [26] Brainard G.C., Hanifin J.P., Warfield B., Stone M.K., James M.E., Ayers M., Kubey A., Byrne B., Rollag M., *Short-wavelength enrichment of polychromatic light enhances 98 human melatonin suppression potency*, Journal of Pineal Research, 2015, 58 (3), s. 352–361, DOI: 10.1111/jpi.12221.
- [27] Chellappa S.L., Steiner R., Blattner P., Oelhafen P., Götz T., Cajochen C., *Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert?*, PLoS One, 2011, 6 (1), art. e16429, DOI: 10.1371/journal.pone.0016429.
- [28] Randler C., *Sleep, sleep timing and chronotype in animal behavior*, Animal Behaviour, 2014, 94, s. 161–166.
- [29] Bartnicka M., *Podwójne zanieczyszczenie*, Kosmos 2015, 64, 4 (309), s. 525–536.
- [30] Ziólkowska A., Dobiesz M., *Wrażliwość roślin na zanieczyszczenie światłem na przykładzie Euphorbia pulcherrima L.*, III Ogólnopolska Konferencja na temat Zanieczyszczenia światłem, Kraków 25–27 września 2015, Wydawnictwo Naukowe Politechniki Krakowskiej, 2015, s. 55.
- [31] Grygorowicz R., *Polskie mury: graffiti, sztuka czy wandalizm?*, Wydawnictwo Comer, Warszawa, 1991.
- [32] Petri J., *Somatyka miejskich dyscyplin performatywnych*, Universitas, Kraków, 2020.
- [33] Shusterman R., *Pragmatist Aesthetics and East-Asian Philosophy*, IV – 1 Pragmatism and the Social Sciences: A Century of Influences and Interactions, vol. 2. A Symposium on R. Shusterman, Pragmatist Aesthetics: 20 years later. European Journal of Pragmatism and American Philosophy, 2012.

## THE ROLE OF LIGHT IN THE CITY

**Abstract:** Architecture is defined as the masterly, correct, and magnificent play of volumes brought together in light – it becomes a transcendental creation, subject to constant changes, it goes beyond its predefined form, creating an infinite number of ways to read it anew. The perception of urban space, our well-being, sense of security, ambience, and the context of an environment are all influenced by light. First, the role of light in the history of city shaping over the centuries will be presented from an urban perspective. The importance of light in modern cities will then be discussed. It is critical for the functioning of the urban tissue, beginning with the rhythm of life of the inhabitants and continuing with all original manifestations of creativity and use of the existing environment to create performative performances. When designing an urban structure, we cannot only consider aspects that are important to humans, because natural factors have a significant impact on how people perceive space. When confronted with sustainable design, environmental considerations common to our organism (soma) and flora and fauna do not provide a clear solution on how we should design urban lighting. In conclusion, from an architectural standpoint, what solutions would be appropriate in the contexts relevant to the most important perspectives – environmental, urban, and philosophical – will be considered.

**Keywords:** light pollution, architecture, performance, city, philosophy of space