An aerial night photograph of a city. The top half shows a dense urban area with numerous lights from buildings and streets. In the center, a large, dark, rectangular area is brightly illuminated from below, possibly a stadium or a large public square. The bottom half of the image is mostly dark, with some faint lights visible in the distance.

Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba  
– w stronę interdyscyplinarnego poznania,  
monitoringu i przeciwdziałania

Light pollution of the night sky – towards  
interdisciplinary cognition, monitoring  
and counteraction

Redakcja naukowa / Edited by  
Mieczysław Kunz

**Redakcja naukowa / Edited by  
Mieczysław Kunz**

**Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba  
– w stronę interdyscyplinarnego poznania,  
monitoringu i przeciwdziałania**

**Light pollution of the night sky – towards  
interdisciplinary cognition, monitoring  
and counteraction**



**Redakcja naukowa / Edited by  
Mieczysław Kunz**

**Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba  
– w stronę interdyscyplinarnego poznania,  
monitoringu i przeciwdziałania**

**Light pollution of the night sky – towards  
interdisciplinary cognition, monitoring  
and counteraction**

**Toruń 2023**



Monografia naukowa przedstawia stan poznania, problematykę oraz aktualne wyniki badań, sposobów prowadzenia pomiarów i propozycji działań ograniczających skutki oraz opisuje podejmowane aktywności edukacyjno-popularyzatorskie w Polsce w zakresie **zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba**. Przyczyną występowania tej coraz częściej obserwowanej, powszechnie odczuwalnej i dynamicznie postępującej formy degradacji środowiska geograficznego jest człowiek, jego niewłaściwa, nieprzemyślana i nader często wciąż nieświadoma konsekwencji działalność. A konsekwencje tej działalności ponosi nie tylko sam człowiek, przyczyniając się do rozwoju tzw. chorób cywilizacyjnych, ale także otaczająca go przyroda, której degradację obserwujemy z coraz większym niepokojem. Wiedza o źródłach i mechanizmach powstawania, uwarunkowaniach występowania oraz sposobach ograniczania skutków zanieczyszczenia światłem wydaje się być niezwykle istotna dla życia, zdrowia i funkcjonowania człowieka w XXI wieku.

**Recenzenci:**

prof. dr hab. Andrzej Nienartowicz (*Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu*)  
prof. dr hab. Roman Soja (*Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie / IGiPZ PAN Kraków*)

**Redakcja naukowa monografii:**

dr hab. Mieczysław Kunz, prof. UMK (*Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu*)

**Skład i edycja:**

Mieczysław Kunz

**Projekt okładki:**

Joanna Uzdowska

**Zdjęcie na okładce:**

Widok na Kopernikański Ośrodek Integracji w Toruniu (fot. Mieczysław Kunz)

**Wydawnictwo Naukowe UMK**

ul. Gagarina 11, 87-100 Toruń

**Redakcja:** tel. 56 611 42 95  
e-mail: [wydawnictwo@umk.pl](mailto:wydawnictwo@umk.pl)  
[www.wydawnictwo.umk.pl](http://www.wydawnictwo.umk.pl)

ISBN 978-83-231-5191-3  
eISBN 978-83-231-5192-0  
<https://doi.org/10.12775/978-83-231-5192-0>

**Druk i oprawa:**

Wydawnictwo Naukowe UMK



SFINANSOWANO ZE ŚRODKÓW NARODOWEGO INSTYTUTU WOLNOŚCI – CENTRUM  
ROZWOJU SPOŁECZEŃSTWA OBYWATELSKIEGO W RAMACH RZĄDOWEGO PROGRAMU  
ROZWOJU ORGANIZACJI OBYWATELSKICH NA LATA 2018–2030 PROO

## Spis treści

	<b>Autorzy monografii</b> .....	9
	<b>Wstęp</b> .....	11
	<i>Mieczysław Kunz</i>	
Rozdział 1	<b>Wpływ ALAN na rytm snu i czuwania oraz zdrowie człowieka</b> .....	13
	<i>Krystyna Skwarło-Sońta, Krystyna Zużewicz</i>	
Rozdział 2	<b>Oddziaływanie zanieczyszczenia światłem na rośliny – co wiemy i czego się spodziewamy</b> .....	33
	<i>Anna Kołton, Monika Czaja</i>	
Rozdział 3	<b>Zanieczyszczenie światłem jako czynnik odpowiedzialny za globalną apokalipsę owadów – podsumowanie badań</b> .....	53
	<i>Karolina Skorb</i>	
Rozdział 4	<b>Zanieczyszczenie światłem na przykładzie Krakowa</b> .....	77
	<i>Barbara Wiśniowska-Kielian, Lidia Filipiak, Karolina Kielian</i>	
Rozdział 5	<b>Przestrzenna i czasowa analiza zanieczyszczenia sztucznym światłem miejskiego nieba na przykładzie Torunia</b> .....	101
	<i>Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz</i>	
Rozdział 6	<b>Krzywa wrażeń Wejcherta jako narzędzie identyfikacji zanieczyszczenia światłem w przestrzeni miejskiej</b> .....	119
	<i>Hubert Horynek</i>	
Rozdział 7	<b>Tendencje zmian zanieczyszczenia sztucznym światłem w Wielkopolsce w latach 1992–2013</b> .....	135
	<i>Wiktoria Kocięda, Paweł Bogawski</i>	
Rozdział 8	<b>Zanieczyszczenie świetlne na obszarze Parku Krajobrazowego Beskidu Małego</b> .....	151
	<i>Tomasz Ścieżor</i>	
Rozdział 9	<b>Pomiar zanieczyszczenia światłem nocnego nieba – od demonstratora technologii do systemu monitoringu</b> .....	171
	<i>Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz</i>	
Rozdział 10	<b>Wpływ użytego luksomierza na wyniki pomiarów wertykalnego natężenia oświetlenia na nieruchomościach mieszkalnych</b> .....	195
	<i>Przemysław Tabaka, Tomasz Ścieżor</i>	
Rozdział 11	<b>Problematyka wizualizacji kartograficznej wyników pomiarów zanieczyszczenia światłem nocnego nieba</b> .....	209
	<i>Mieczysław Kunz, Dominika Karpińska</i>	
Rozdział 12	<b>Zrównoważone kształtowanie oświetlenia zewnętrznego – narzędzia możliwe do zastosowania na poziomie gminy</b> .....	233
	<i>Agnieszka Machnowska</i>	

Rozdział 13	<b>Ocena wykorzystania mediów społecznościowych jako narzędzia promocji obszarów ochrony ciemnego nieba .....</b>	<b>245</b>
	<i>Grzegorz Iwanicki</i>	
Rozdział 14	<b>Light Pollution Think Tank .....</b>	<b>259</b>
	<i>Piotr Nawalkowski</i>	
Rozdział 15	<b>Edukacja przez eksperyment i zabawy badawcze – przykład zestawów edukacyjnych .....</b>	<b>277</b>
	<i>Anna Kołton, Grzegorz Iwanicki, Sylwester Kołomański, Agnieszka Machnowska, Piotr Nawalkowski, Karolina Skorb, Krystyna Skwarło-Sońta, Przemysław Tabaka</i>	

## Contents

	<b>Authors of the monograph</b> .....	9
	<b>Introduction</b> .....	11
	<i>Mieczysław Kunz</i>	
Chapter 1	<b>The influence of ALAN on the rhythm of sleep and wakefulness and human health</b> .....	13
	<i>Krystyna Skwarło-Sońta, Krystyna Zużewicz</i>	
Chapter 2	<b>The impact of light pollution on plants – what we know and what to expect</b> .....	33
	<i>Anna Kołton, Monika Czaja</i>	
Chapter 3	<b>Light pollution as a factor responsible for the global insect apocalypse – research review</b> .....	53
	<i>Karolina Skorb</i>	
Chapter 4	<b>Light pollution on example of Cracow</b> .....	77
	<i>Barbara Wiśniowska-Kielian, Lidia Filipiak, Karolina Kielian</i>	
Chapter 5	<b>Spatial and temporal analysis of artificial light pollution of the city night sky – a case study from Toruń</b> .....	101
	<i>Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz</i>	
Chapter 6	<b>Weichert's impression curve method as a tool for identifying light pollution in urban space</b> .....	119
	<i>Hubert Horynek</i>	
Chapter 7	<b>Trends in artificial light pollution changes at night in Wielkopolska (1992–2013)</b> .....	135
	<i>Wiktoria Kocięda, Paweł Bogawski</i>	
Chapter 8	<b>Light pollution in the area of the Beskid Mały Landscape Park</b> ....	151
	<i>Tomasz Ścieżor</i>	
Chapter 9	<b>Measuring light pollution in the night sky – from technology demonstrator technology to monitoring system</b> .....	171
	<i>Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz</i>	
Chapter 10	<b>The impact of the used luxmeter on the results of measurements of vertical illuminance on residential real estate</b> .....	195
	<i>Przemysław Tabaka, Tomasz Ścieżor</i>	
Chapter 11	<b>Issues related to cartographic visualization of light pollution measurements</b> .....	209
	<i>Mieczysław Kunz, Dominika Karpińska</i>	
Chapter 12	<b>Sustainable development of outdoor lighting – tools that can be used at the municipal level</b> .....	233
	<i>Agnieszka Machnowska</i>	

Chapter 13	<b>The assessment of using social media as a tool for promoting dark-sky protected areas</b> .....	245
	<i>Grzegorz Iwanicki</i>	
Chapter 14	<b>Light Pollution Think Tank</b> .....	259
	<i>Piotr Nawalkowski</i>	
Chapter 15	<b>Education through experiment and research games – example of educational kits</b> .....	277
	<i>Anna Kołton, Grzegorz Iwanicki, Sylwester Kołomański, Agnieszka Machnowska, Piotr Nawalkowski, Karolina Skorb, Krystyna Skwarło-Sońta, Przemysław Tabaka</i>	

## **Autorzy monografii / Authors of the monograph**

<b>Paweł Bogawski</b>	Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu Wydział Biologii
<b>Monika Czaja</b>	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa
<b>Lidia Filipiak</b>	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie Wydział Rolniczo-Ekonomiczny
<b>Hubert Horynek</b>	Politechnika Warszawska Wydział Geodezji i Kartografii
<b>Grzegorz Iwanicki</b>	Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie Instytut Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej
<b>Dominika Karpińska</b>	Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej
<b>Karolina Kielian</b>	Zespół Szkolno-Przedszkolny w Balicach
<b>Wiktoria Kocięda</b>	Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu Wydział Biologii
<b>Sylwester Kołomański</b>	Uniwersytet Wrocławski Instytut Astronomiczny
<b>Anna Kołton</b>	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa
<b>Mieczysław Kunz</b>	Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej
<b>Agnieszka Machnowska</b>	Urząd Miasta Stołecznego Warszawy Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego
<b>Piotr Nawalkowski</b>	Stowarzyszenie POLARIS-OPP Program Ciemne Niebo – Polska
<b>Karolina Skorb</b>	Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt PAN Zespół Ekologii Krajobrazu
<b>Krzyszyna Skwarło-Sońta</b>	Uniwersytet Warszawski Wydział Biologii (emerytowany pracownik naukowy)
<b>Tomasz Ścieżor</b>	Politechnika Krakowska Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
<b>Przemysław Tabaka</b>	Politechnika Łódzka Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechnika Krakowska Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
<b>Barbara Wiśniowska-Kielian</b>	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie Wydział Rolniczo-Ekonomiczny
<b>Krzyszyna Zużewicz</b>	emerytowany pracownik naukowy



## Wstęp

Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba jest powszechnie już obserwowaną i dynamicznie postępującą formą degradacji środowiska geograficznego, której główną przyczyną jest człowiek: jego niewłaściwa, nieprzemyślana i nader jeszcze często wciąż nieświadoma konsekwencji działalność. Zostało ono po raz pierwszy zdefiniowane na łamach czasopisma *Science*, i od tego czasu obserwuje się powolny wzrost zainteresowania opisywaną tematyką badawczą, podejmowaną przez kolejne grupy specjalistów.

Początkowo problem dostrzegali tylko astronomowie czy miłośnicy naturalnie ciemnego nocnego nieboskłonu, którzy zaniepokojeni byli pogarszającymi się warunkami prowadzenia obserwacji. Następnie przyrodnicy informowali o zmianach w zachowaniu i cyklach rozwojowych wybranych gatunków roślin i zwierząt, a potem przyszły alarmujące doniesienia o związku zanieczyszczenia światłem z funkcjonowaniem oraz jakością życia człowieka i w konsekwencji negatywnym wpływem na jego zdrowie i codzienne samopoczucie. Poruszane zjawisko rozwija się bardzo intensywnie, według niektórych badaczy wręcz wykładniczo, i dotyczy już dzisiaj całego globalnego ekosystemu, powodując bardzo duże koszty przyrodnicze, społeczne, ekonomiczne i co najbardziej niepokojące – zdrowotne.

Badanie emisji sztucznego światła w dolną część troposfery jest jednak problemem niezmiernie złożonym i wieloaspektowym, wymagającym podejmowania ukierunkowanych, interdyscyplinarnych działań, analiz i eksperymentów realizowanych na styku kilku dyscyplin naukowych: astronomii, nauk biologicznych, nauk fizycznych, nauk o Ziemi i środowisku, geografii społeczno-ekonomicznej i gospodarki przestrzennej, architektury i urbanistyki, nauk medycznych i nauk o zdrowiu, czy inżynierii lądowej i transportu, inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki oraz innych pokrewnych dziedzin.

Takie holistyczne podejście do badania problematyki zanieczyszczenia światłem wymusza niejako tworzenie formalnych czy nieformalnych zespołów badawczych i grup eksperckich. W 2022 roku powstał *Light Pollution Think Tank* – pierwszy krajowy multidyscyplinarny zespół ekspertów, w którego skład weszli przedstawiciele świata nauki, administracji publicznej oraz organizacji pozarządowych, i który od razu podjął się realizacji wielu ciekawych inicjatyw i działań. Powstanie tego gremium było możliwe za sprawą zaangażowania działaczy Programu Ciemne Niebo Stowarzyszenia POLARIS-OPP, którzy pozyskali środki z Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego (NIW-CRSO) z Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich PROO 4.

Niniejsze, wieloautorskie opracowanie monograficzne pt. *Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba – w stronę interdyscyplinarnego poznania, monitoringu i przeciwdziałania* przedstawia doświadczenia wybranych środowisk, instytucji, organizacji i osób aktywnie uczestniczących w badaniach zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba, realizowanych w różnych miejscach naszego kraju, z wykorzystaniem dostępnych metod, narzędzi i często pionierskich pomysłów. Autorów monografii naukowej połączył jeden cel – potrzeba wnikliwszego oraz pełniejszego poznania skali, zasięgu, mechanizmów, uwarunkowań i konsekwencji zjawiska zanieczyszczenia światłem, a także skutecznych sposobów jego ograniczaniu i redukcji.



Dodatkowym spodziewanym elementem tego opracowania jest edukacja, popularyzacja oraz upowszechnianie informacji o tym problemie natury antropogenicznej, nie tylko obecnym na obszarach zurbanizowanych, ale także w miejscach odległych od skupisk ludzkich, służące sygnalizowaniu i zwiększaniu w społeczeństwie świadomości istnienia, zasięgu, wielkości i znaczenia zjawiska.

W skomplikowanej materii badań nad problematyką zanieczyszczenia światłem, zwłaszcza w trzeciej dekadzie XXI wieku, założony cel może być skutecznie realizowany przede wszystkim przez przemyślane, ukierunkowane i wspólne działania podejmowane przez naukowców, przedstawicieli samorządów, organizacji pozarządowych, a także firm branży techniczno-oświetleniowej, na styku nauki i eksperymentu, teorii i praktyki oraz szerokiego procesu konsekwentnego upowszechniania dotychczasowego stanu wiedzy i poznania.

Książka jest kontynuacją kilku wcześniej opublikowanych w Polsce zbiorczych opracowań naukowych wydanych przez: Uniwersytet Warszawski (red. Małgorzata Roge-Wiśniewska i Katarzyna Tomasik, 2015), KOSMOS (red. Tomasz Ścieżor, 2015), Uniwersytet Rzeszowski (red. Joanna Kostecka, 2017), Centrum Badań Kosmicznych PAN (red. Andrzej Z. Kotarba, 2019), Politechnikę Krakowską (red. Tomasz Ścieżor, 2021) oraz Politechnikę Łódzką (red. Przemysław Tabaka, 2022), a także innych prac o charakterze monograficznym.

Prace nad niniejszą monografią realizowane były w pierwszym roku działalności krajowego *Light Pollution Think Tank*, a jej wydanie w Toruniu zbiega się z jubileuszem 550. rocznicy urodzin i miejsca przyścia na świat Mikołaja Kopernika, wybitnego uczonego i astronoma, a także 50-leciem pierwszego zdefiniowania pojęcia *zanieczyszczenie światłem*, zaproponowanego przez amerykańskiego badacza Kurta W. Riegela z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Los Angeles (USA) na łamach prestiżowego czasopisma *Science*.

Chciałbym bardzo serdecznie podziękować wszystkim autorom rozdziałów za twórczy wysiłek włożony w ich powstanie, a także za systematyczne prowadzenie badań, często o charakterze interdyscyplinarnym, nad wybranymi aspektami zanieczyszczenia świetlnego oraz za upowszechnianie wiedzy o tej formie degradacji środowiska, wciąż mało obecnej w świadomości społecznej. Nasze wspólne działania inspirują następne grupy badaczy i inne zainteresowane osoby do podejmowania dalszych pogłębionych analiz, eksperymentów i ukierunkowanych badań naukowych, a także posłużą popularyzacji i wzmacnianiu świadomości istnienia tego zjawiska w życiu codziennym i informowaniu o konsekwencjach zdrowotnych dla człowieka oraz innych organizmów żywych.

Szczególne podziękowania kieruję na ręce Pani Profesor Krystyny Skwarło-Sońty z Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego za bycie dobrym duchem tej monografii, za okazane wsparcie, pomoc i nieustanne motywowanie do wyczerpanej pracy nad spójnością całego opracowania, które w zamyśle powinno pomóc w procesie rozumienia tej trudnej materii, jaką jest ciemność, a w zasadzie jej coraz częstszy brak czy odczuwalne ograniczanie. Dziękuję także za wszelkie uwagi merytoryczne oraz te o charakterze dyskusyjnym, otrzymane podczas kilkumiesięcznego okresu realizacji procesu edycyjno-redakcyjnego oddawanej czytelnikom monografii naukowej.

*Mieczysław Kunz*

Krystyna Skwarło-Sońta, Krystyna Zużewicz

## Wpływ ALAN na rytm snu i czuwania oraz zdrowie człowieka

### Wprowadzenie

Wśród różnych definicji skażenia światłem (Skwarło-Sońta 2023) spotykamy również takie, które nawiązując do obecności sztucznego światła w nocy (ALAN, ang. *Artificial Light At Night*) zwracają uwagę na jego niekorzystny wpływ na wiele obszarów funkcjonowania organizmu człowieka. Zakłócone naturalne cykle światła i ciemności, powodując desynchronizację systemu okołodobowego mieszkańców Ziemi oraz zaburzenia rytmu dobowego syntezy melatoniny (Hardeland 2014) skutkują upośledzeniem licznych funkcji organizmu (Navara i Nelson 2007). Podstawową czynnością życiową człowieka przebiegającą w rytmie dobowym jest sen i jego naprzemiennosc z czuwaniem. Z dużą dozą prawdopodobieństwa można przyjąć, że zaburzenie rytmu snu i czuwania stanowi punkt wyjścia większości, a być może wszystkich, komplikacji zdrowotnych, na które można się natknąć, analizując skutki działania ALAN. Przeglądowi piśmiennictwa dotyczącego takich problemów zdrowotnych ludzi poświęcone jest niniejsze opracowanie.

### Sen i jego rola biologiczna

Zapadanie człowieka w sen (dotyczy to także większości zwierząt, ale my zajmiemy się wyłącznie snem człowieka) wiąże się nie tylko ze znalezieniem odpowiedniego miejsca i przyjęciem takiej pozycji ciała, która pozwoli na nieruchomość (Achermann i Tarokh 2014), ale także z obniżeniem tempa metabolizmu skutkującym spadkiem głębokiej temperatury ciała, czemu towarzyszy wzrost syntezy melatoniny (Lack i Wright 2007). Pojawienie się

antyfazy tych dwóch wskaźników jest warunkiem zaśnięcia, zaś pory tuż przed i po osiągnięciu tej zależności są okresami najłatwiejszego wybudzania. Jest to związane z kolejnymi cechami charakterystycznymi dla stanu uśpienia, tj. znacznie podwyższonym progiem pobudliwości oraz łatwością wybudzania. Na regulację snu składają się dwa czynniki: homeostatyczny i okołodobowy. Pierwszy jest zależny od następujących po sobie okresów snu i czuwania: potrzeba snu nasila się w miarę upływu czasu od zakończenia ostatniego okresu snu i wyłącza ją dopiero ponowne zapadnięcie w sen, a po obudzeniu się proces homeostatyczny rozpoczyna się od nowa. Natomiast czynnik okołodobowy jest procesem rytmicznym: sen i czwanie następują po sobie regularnie (Achermann i Tarokh 2014).

Normalny przebieg snu w ciągu jednej nocy polega na pojawianiu się kilku cykli, trwających przeciętnie 1,5–2 godzin, zaś każdy cykl obejmuje 4 fazy snu, przedzielane wybudzeniami. Te fazy to trzy kolejne stadia tzw. snu wolnofalowego (NREM), po których następuje sen REM (czasem zwany też snem paradoksalnym, Jurkowlaniec 2014). Faza snu REM bierze swoje określenie od angielskich słów *Rapid Eye Movements*, opisujących sytuację, kiedy gałki oczne osoby śpiącej poruszają się gwałtownie zaś ciało jest zrelaksowane i nieruchome, natomiast aktywność elektryczna mózgu przypomina zapis występujący w fazie czuwania (i to jest właśnie ten paradoks!). Wtedy też mają miejsce marzenia senne. Natomiast trzy stadia snu NREM, podczas których nie obserwuje się ruchu gałek ocznych (czyli non REM), są to kolejne fazy pogłębiania się snu. Faza 1. to zazwyczaj krótki, 5–10 minutowy okres zasypiania, po którym w zapisie EEG (Elektro-Encefalo-Graficznym) pojawiają się tzw. wrzeciona snu, spada tętno (spowalnia się praca serca), obniża się temperatura ciała, czyli wkracamy w fazę 2. NREM. Po niej następuje faza 3., czyli sen najgłębszy, kiedy ma miejsce relaksacja mięśni, jednoczesna ze spadkiem ciśnienia krwi i częstości oddechów. Niekiedy wyróżnia się jeszcze fazę 4. (najgłębszą) snu NREM – w przebiegu nocy fazy 3. (i 4.) snu NREM stają się coraz krótsze, sen się słyca, wydłużają się natomiast odcinki snu REM (zobacz ryc. 1 i 2 w pracy Achermann i Tarokh 2014).

Do pełnego wyjaśnienia pozostaje jeszcze biologiczna rola snu, ciągle będąca przedmiotem dociekań naukowców, zwłaszcza, że jest to stan, podczas którego osobnik nie pobiera pokarmu, nie może opiekować się potomstwem, a podwyższony próg wrażliwości na bodźce częściowo izoluje go od kontaktów z otoczeniem. Skoro jednak człowiek poświęca na sen około 1/3 całego życia to musi to być ważny proces adaptacyjny, który przetrwał w toku ewolucji. Wydaje się jednak, że w dość kompletny sposób rolę snu określają następujące funkcje: oszczędzanie energii i korzystne nią gospodarowanie, czasowe uporządkowanie

metabolizmu oraz zabezpieczanie wyższych czynności mózgu: plastyczności synaps, konsolidacji pamięci, kreatywności (Bringmann 2010). Istnieje ogólna zgodność, że właściwy sen jest gwarantem zdrowia (Zhu i in. 2023) a ustanowiony w 2008 r. Światowy Dzień Snu ma za zadanie promować w społeczeństwach tę świadomość. Tegorocznym (2023) hasłem Dnia Snu było: *Quality Sleep, Sound Mind, Happy World* (Dobry sen, zdrowy umysł, szczęśliwy świat – World Sleep Day, March 17, 2023).

### **System zegarowy człowieka**

Jak to zostało wcześniej powiedziane, sen i czwanie następują po sobie regularnie w ciągu 24-godzinnej doby, w której okres ciemności, czyli noc jest dla ludzi naturalną porą snu. Jest to jeden z najlepiej wyrażonych rytmów dobowych (a raczej okołodobowych, ponieważ nie zawsze zamykają się dokładnie w 24 godzinach), które obok temperatury ciała i wydzielania większości hormonów kształtują fizjologię i behavior człowieka. Nad uporządkowaniem przebiegu poszczególnych procesów w ciągu doby czuwają endogenne mechanizmy odmierzające czas, określane łącznie jako zegar biologiczny (Dibner i in. 2010). Centralny zegar znajduje się w parzystych jądrach nadskrzyżowaniowych mózgu (SCN, ang. *Suprachiasmatic Nuclei*), a zmienna w ciągu doby aktywność elektryczna budujących je neuronów generuje rytmiczne uwalnianie neuroprzekaźników (głównie kwasu  $\gamma$ -aminomasłowego GABA i glutaminianu) będących źródłem informacji dla komórek i narządów organizmu. Zaś za rytmiczne wydzielanie neuroprzekaźników odpowiada zmieniająca się także w ciągu doby ekspresja szczególnej grupy genów, tzw. zegarowych, za których zbadanie na poziomie molekularnym została w 2017 roku przyznana nagroda Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny. Szczegółowe omówienie tego ważnego odkrycia wybiega poza ramy niniejszego opracowania – zainteresowanych odsyłam do dostępnych źródeł internetowych lub np. do dostępnego on-line artykułu Giebultowicz (2018). Obecnie wiemy, że system zegarowy organizmu nie ogranicza się do centralnego mechanizmu znajdującego się w SCN, ale w jego skład wchodzi liczne zegary obwodowe (peryferyczne), zlokalizowane w większości narządów – a może we wszystkich? – których rytmiczne funkcjonowanie dostosowuje przebieg czynności życiowych osobnika do warunków otoczenia. Dzięki temu poszczególne procesy mają swoje nasilenie we właściwej porze doby – są zsynchronizowane ze środowiskiem.

Żeby to jednak mogło nastąpić, system zegarowy musi otrzymywać informacje o tym „co się dzieje na zewnątrz” – nośniki tych informacji nazywamy „dawcami czasu” dla zegara biologicznego (Roenneberg i in. 2013). Dawca czasu

musi być zrozumiały dla struktur odbierających tę informację – dla zegara centralnego takim potężnym dawcą czasu jest światło, które – jak wszyscy intuicyjnie czujemy – jest odbierane za pośrednictwem oczu. Tutaj dokonuje się przekodowanie tej informacji na język zrozumiały dla komórek nerwowych, a specjalne (pozawzrokowe) drogi nerwowe przekazują tę informację do SCN, skąd drogą nerwową i hormonalną jest rozsyłana do innych struktur, zaangażowanych w synchronizację i koordynację funkcji wszystkich tkanek i narządów.

### **Szyszynka i melatonina – wewnętrzny zegar i kalendarz organizmu**

Jedną ze struktur, odbierających informację o warunkach świetlnych otoczenia, jest szyszynka, gruczoł neuroendokrynowy zlokalizowany w pobliżu III komory mózgu, którego funkcja polega na rytmicznej w ciągu doby syntezie hormonu melatoniny, zwanej także hormonem ciemności (Møller i Baeres 2002). Cechą szczególną syntezy melatoniny jest jej hamowanie przez światło, co oznacza, że powstaje w szyszynce prawie wyłącznie w ciemnej fazie doby. Dłuższa lub krótsza noc, zmieniając się sezonowo w strefie klimatu umiarkowanego, określa czas syntezy melatoniny, co jest wskazówką o aktualnej i zbliżającej się porze roku. Melatonina nie jest w szyszynce gromadzona, tylko od razu uwalniana do krwi, z którą roznosi po organizmie informację o panującej ciemności – jest zatem uważana za „zegar i kalendarz organizmu” (Reiter 1993; Stehle i in. 2011). Dzięki temu nawet najbardziej wewnętrzne narządy otrzymują informację o tym, że na zewnątrz jest noc. I odwrotnie – brak melatoniny (której zawartość we krwi w dzień jest minimalna) świadczy o braku ciemności, co pozwala organizmowi przystąpić do wzmożonej aktywności związanej z jasną fazą doby. Co zatem się dzieje w organizmie, jeśli z jakiegoś powodu światło pojawi się w porze naturalnej ciemności; innymi słowy: jeśli noc zostanie przerwana przez obecność sztucznego światła, czyli przez ALAN?

### **ALAN jako skażenie środowiska**

Problem ALAN nie występował w czasach, gdy ludzie stosowali do oświetlenia otaczających ich ciemności stopniowo coraz doskonalsze źródła światła sztucznego, poczynając od ogniska, łuczywa, świecy, przez lampy naftowe, gazowe czy nawet lampy żarowe. Pojawił się wraz z rozpowszechnieniem energooszczędnych źródeł światła sztucznego, takich jak np. elektroluminescencyjne diody LED, emitujące fale o długości porównywalnej ze środowiskowym sygnałem fazy jasnej (dnia w dobowym cyklu światło-ciemność), pobudzającym organizm do aktywności. Termin „światło sztuczne” jest pojęciem bardzo szerokim, bo dotyczy światła emitowanego z różnych źródeł, o różnej charakterystyce widmowej i temperaturze barwowej, co ma

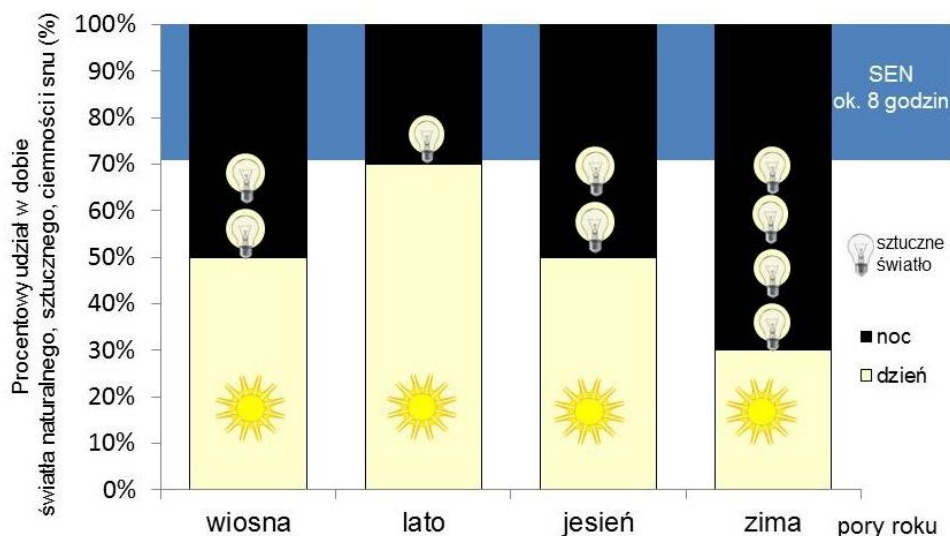
istotne znaczenie dla oceny jego wpływu na człowieka czy inne żywe organizmy. Na przykład wykazano, że nocna ekspozycja na światło o temperaturze barwowej 2300K (200 lx) nie wpływa istotnie na poziom wydzielanej melatoniny u ludzi (Kozaki i in. 2015), natomiast problem stanowi światło emitowane przez niebieskie diody LED.

Analiza danych pochodzących z obserwacji przeprowadzonych w latach 2011–2022 pozwoliła stwierdzić, że w wyniku sztucznego oświetlenia „tło nieba” zwiększa się o 10% rocznie, sprawiając, iż najciemniejsze gwiazdy „ukrywane są” na nocnym niebie. Przewiduje się, że po upływie około 8 lat nastąpi podwojenie tego zjawiska (Kyba i in. 2023), choć oszacowanie to wydaje się niepełne, gdyż opiera się na pomiarach wykonanych przez satelity wyposażone w detektory „ślepe” na niebieskie światło emitowane przez diody LED, zastępujące w coraz większym stopniu starsze oprawy oświetleniowe. Ponadto zastosowane w badaniu detektory nie wykrywały światła emitowanego prawie poziomo np. z billboardów czy elewacji budynków (Falchi i Bará 2023). Dla ludzi fakt ten ma znaczenie ze względu na niedoszacowanie ilości światła docierającego do mieszkań, zaś dla zwierząt i roślin – ilości światła mogącego zaburzać ich prawidłowy rozwój i funkcjonowanie. Wydaje się więc, że dotychczasowe rozwiązania techniczne nie pozwalają na właściwą ocenę rzeczywistego wpływu ALAN na środowisko (Gaston i Sánchez de Miguel 2022). Nawet przyjmując powyższe zastrzeżenia, obserwacje biologów wskazują, że wprowadzanie do ekosystemów sztucznego światła na poziomie przekraczającym ilość światła doświadczanego w warunkach naturalnych, powoduje zmiany w zachowaniu zwierząt i może wpływać na zmniejszenie bioróżnorodności. Większa ilość światła w nocy sprzyja drapieżnikom aktywnym o tej porze, ale dla innych gatunków np. owadów nocnych i nietoperzy, może zwiększać zagrożenie wyginięcia, lokalnego lub globalnego (Skwarło-Sońta i Zużewicz 2022).

### **Skutki fizjologiczne działania ALAN na organizm człowieka**

Wpływ na organizm człowieka ekspozycji na światło sztuczne w nocy jest przedmiotem badań prowadzonych od co najmniej dwóch dekad. Wykazano w nich, że ALAN niezależnie od pochodzenia oświetlenia (zewnątrznego czy wewnętrznego), wywołuje u ludzi szeroką gamę negatywnych efektów, będących konsekwencją zaburzenia pracy endogennego zegara biologicznego. Porównywanie wyników różnych badań dotyczących tego problemu nie jest łatwe, gdyż wpływ ALAN na funkcjonowanie i zdrowie człowieka zależy po części od pory doby i czasu trwania ekspozycji, a także od natężenia i charakterystyki widmowej źródła światła (Brainard i in. 1988, 2015; Cho i in.

2015; Münch i in. 2006; West i in. 2011). Nie bez znaczenia jest także chronotyp badanej osoby, co dodatkowo komplikuje interpretację zaobserwowanych zależności (Skwarło-Sońta i Zużewicz 2019). Kolejnym utrudnieniem jest to, że w zależności od pory roku zmienia się czas trwania naturalnej ciemności, czyli okres nocnej ekspozycji na sztuczne światło (ryc. 1).



Ryc. 1. Ekspozycja na światło naturalne i sztuczne w zależności od pory roku (opracowanie własne).

Negatywny wpływ na zdrowie człowieka może mieć zarówno niewystarczająca ilość światła naturalnego, jak i nadmiar światła sztucznego, jednak największy wpływ na zachowanie i zdrowie człowieka wydaje się mieć nocna ekspozycja na światło sztuczne. Pierwszy przypadek może sprzyjać wystąpieniu objawów depresji, zwłaszcza w okresie zimowym, ale wówczas światło sztuczne o odpowiednio dobranej charakterystyce i zastosowane w odpowiedniej porze doby może stanowić korzystny element terapii (van Maanen i in. 2015). W drugim przypadku ALAN może spowodować zahamowanie produkcji szyszynkowej melatoniny (Brainard i in. 2015), skrócenie trwania snu, a przedłużająca się ekspozycja może skutkować problemami zdrowotnymi. Coraz liczniejsze badania potwierdzają, że chroniczna ekspozycja na ALAN nie tylko zaburza sen i schemat aktywności dobowej, ale także wiąże się z wysokim ryzykiem chorób nowotworowych (Reiter i in. 2009; Kloog i in. 2009; Stevens i in. 2014; Yang i in. 2014), metabolicznych, chorób serca, cukrzycy, otyłości i zaburzeń nastroju (Gangwisch 2014; Stevens i in. 2009).

Jak wspomniano, dla regulacji procesów fizjologicznych nie ma znaczenia, skąd pochodzi ALAN. Wyniki badań, którymi objęto ponad 330 tysięcy kobiet

i mężczyzn w wieku 50–71 lat, ankietowanych pod względem zdrowotnym i żywieniowym, dotyczyły ekspozycji na zewnętrzne skażenie światłem w nocy, monitorowane przy pomocy meteorologicznego programu satelitarnego USA (Xiao i in. 2020). Uczestnicy badania wypowiedzieli się także m.in. na temat długości okresu snu, która negatywnie korelowała z intensywnością ALAN, co ponadto ukazywało związek z wyższym poziomem ubóstwa w danej okolicy. Mamy więc tutaj dodatkową informację, że nadmiernie oświetlone okolice nie są terenami, gdzie żyje się i śpi luksusowo!

Również najnowsze badania ankietowe przeprowadzone w Irlandii (Cleary-Gaffney i in. 2022) z użyciem zaawansowanych technik monitorujących jasność sypialni i jakość snu ponad 500 osób dorosłych, potwierdziły ścisłą korelację gorszej jakości snu z obecnością ALAN, ale niezależność jakości snu od źródeł światła (zewnętrzne czy wewnętrzne sypialni). Znacznie lepiej udokumentowanych dowodów dostarczyły wieloletnie badania ankietowe, obejmujące ponad 100 tysięcy kobiet w Wielkiej Brytanii w przedziale wiekowym od kilkunastu do ponad 100 lat (McFadden i in. 2014). Badane kobiety określały stopień „jasności lub ciemności” w sypialni, a na podstawie danych ilościowych wyliczano m.in. wskaźnik BMI (ang. *Body Mass Index*) pozwalający ocenić występowanie nadwagi lub otyłości. Kobiety z nadwagą lub otyłością sypiały w pomieszczeniach, w których mogły czytać, widzieć własne dłonie czy rozróżniać sprzęty – a więc nie sypiały w ciemności. Jest to niewątpliwy dowód na zaburzenia regulacji metabolizmu w warunkach braku synchronizacji zegara endogennego przez prawidłowo następujące po sobie okresy światła i ciemności. Te obserwacje są zgodne z wynikami doświadczeń przeprowadzonych na myszach hodowanych w warunkach słabego światła w nocy, które znacząco przybierały na wadze w porównaniu do osobników nie poddawanych takiemu działaniu. Rytm dobowy ekspresji genów związanych z regulacją metabolizmu był u myszy z nadwagą zaburzony w wątrobie i tkance tłuszczowej, dowodząc istotnej roli mechanizmu zegara biologicznego w kontroli procesów metabolicznych oraz związku powstawania otyłości z obecnością ALAN (Fonken i in. 2013).

### **Urządzenia elektroniczne jako źródło ALAN**

W ostatniej dekadzie szybko rośnie wykorzystanie urządzeń elektronicznych z ekranami emitującymi światło. Powszechność ich używania do celów komunikacji, pracy i rozrywki, jak np. czytanie czy oglądanie telewizji sprawiła, że ludzie narażeni są na wpływ niezamierzonego sztucznego światła przez całą dobę, w dzień i w nocy. Badania ankietowe przeprowadzone w USA w 2011 roku ujawniły, że aż 90% badanych nastolatków i dorosłych zgłosiło użycie jakiejś formy urządzenia elektronicznego w sypialni na godzinę przed zaśnięciem



(Gradisar i in. 2013). Ekranów tych urządzeń wykorzystują źródła światła oparte na technologii LED, emitujące światło o dużej intensywności i długości fali hamującej syntezę melatoniny szyszynkowej. Najsilniejszy efekt tłumiący melatoninę wywołuje światło niebieskie o długości fali 460–480 nm, a najsilniejsze oddziaływanie na rytmikę okołodobową, procesy neurohormonalne i sen wywiera światło z obszaru widma pomiędzy 450–550 nm. (Stevens i in. 2009; Wood i in. 2012; Cho i in. 2015). Pomiary melatoniny w ślinie nastolatków spędzających godziny nocne przed monitorem komputera wykazały około 40–70% (odpowiednio po 1 i 2 godz.) redukcję jej zawartości w sytuacji emisji niebieskiego światła, podczas gdy światło bez tej komponenty znacznie słabiej hamowało nocną syntezę tego hormonu (Wood i in. 2012).

Z kolei ankietowe badania australijskie obejmujące ponad 1100 uczniów szkół średnich dostarczyły informacji o porze i jakości snu tej młodzieży podczas zwykłych dni nauki szkolnej i w weekendy, kiedy pora rozpoczęcia lekcji nie narzucała pory porannej pobudki (Gamble i in. 2014). Wszyscy ankietowani używali w sypialni elektronicznych nośników obrazu, czasem nawet kilku, a wieczorne, niekiedy znacznie przedłużające się korzystanie z nich sprawiało, że młodzież przystępowała do nauki po niewystarczająco długim okresie snu. Zaś weekendy to pora jeszcze dłuższego obcowania z urządzeniami elektronicznymi i znacznie późniejsze budzenie się nazajutrz, wynikające z konieczności uzupełnienia całotygodniowych niedoborów snu. Przedłużające się nocne korzystanie z urządzeń elektronicznych sprawiało, że często pobudka wchodziła w kolizję z porą rozpoczęcia lekcji, sugerując (być może wpływając na?) gorsze postępy w nauce, a nawet prowadząc do sugestii, że należałoby opóźnić zwyczajowo przyjęte godziny rozpoczęcia pracy szkół. Nie wydaje się, żeby to był właściwy kierunek działania, zwłaszcza w świetle rekomendacji Amerykańskiej Akademii Pediatrycznej, aby „sypialnia dzieci była strefą wolną od ekranów”<sup>1</sup>. Zapewne nastolatkowie nie czują się dziećmi, ale ograniczenie obecności urządzeń elektronicznych w sypialni może jedynie wyjść na dobre, także dorosłym.

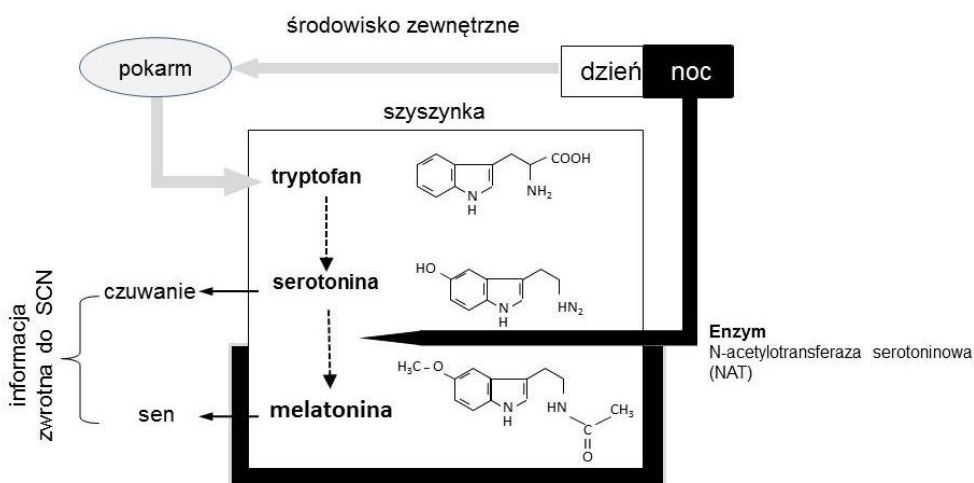
### **Wpływ ALAN na sekrecję szyszynkowej melatoniny**

Jak to już zostało powiedziane, światło działające bezpośrednio na siatkówkę oka stanowi sygnał hamujący syntezę szyszynkowej melatoniny, hormonu zapewniającego „porządek czasowy” procesów biochemicznych zachodzących w organizmie (Turek i in. 2004).

---

<sup>1</sup> Zobacz: <https://www.healthychildren.org/English/family-life/Media/Pages/How-to-Make-a-Family-Media-Use-Plan.aspx>.

Wprowadzenie do codziennego życia źródeł światła emitujących promieniowanie o długości fali z niebieskiej części widma, poszerzyło problemy związane z zaburzeniami pracy zegara biologicznego. Wiadomo, że światło oprócz tego, że jest niezbędne dla widzenia, ma wiele efektów niewizualnych, w tym stymuluje funkcje poznawcze i czujność (Gaggioni i in. 2014). Światło sztuczne w nocy może nie tylko modyfikować dobowy wzorzec wydzielania szyszynkowej melatoniny (Chang i in. 2015; Figueiro i in. 2011), rytm temperatury ciała (Higuchi i in. 2003, 2005), ale może też wpływać na fizjologię snu (Chang i in. 2015; Grønli i in. 2016). ALAN to czynnik zaburzający pełnienie przez melatoninę ważnej roli polegającej na dopasowaniu funkcji życiowych do pory doby, czyli synchronizacji podstawowego rytmu dobowego sen-czuwanie z astronomicznym cyklem noc-dzień (ryc. 2). Ponadto endogenna melatonina pełni w organizmie rolę czynnika odpowiedzialnego za mechanizm obrony – koncepcja osi odpornościowo-szyszynkowej (Markus i in. 2021), uczestniczącej w nadzorze, obronie, przebudowie tkanek i przywracaniu ich funkcji, niestety, wybiega poza ramy niniejszego opracowania.



Ryc. 2. Schemat związku między astronomicznym cyklem światło-ciemność, wydzielaniem szyszynkowej melatoniny i rytmem sen-czuwanie (opracowanie własne).

## Wpływ ALAN na sen

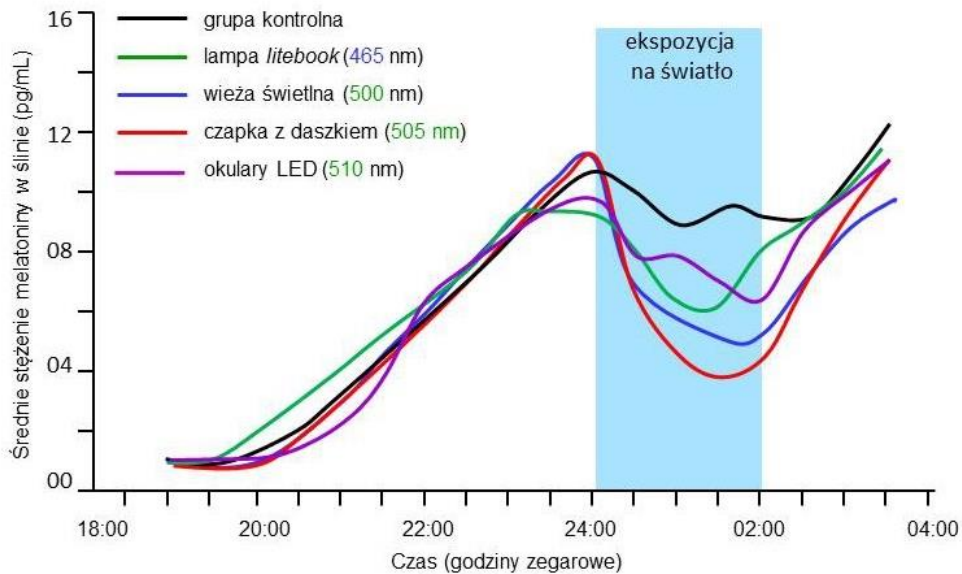
Sterujący czasowym uporządkowaniem funkcji życiowych endogenny zegar biologiczny, po otrzymaniu hormonalnego sygnału (sekrecja melatoniny) o ciemności panującej w środowisku zewnętrznym dopasowuje do niej początek snu. Synchronizacja aktywności dobowej z cyklem światła wymusza na zegarze biologicznym dokonywanie ciągłej korekty sprawiającej, że funkcje organizmu

na różnych poziomach organizacji procesów życiowych są ze sobą zsynchronizowane czasowo. Jeśli proces synchronizacji jest ciągle zakłócany, co ma miejsce np. u osób zatrudnionych w systemie pracy zmianowej ze zmianą nocną, eksponowanych permanentnie na sztuczne światło będące fałszywym sygnałem o jasnej fazie w naturalnym cyklu oświetlenia i hamujące wydzielanie szyszynkowej melatoniny, to prowadzi to nieuchronnie do problemów fizjologicznych, a po pewnym czasie zdrowotnych. Liczne badania epidemiologiczne potwierdziły, że ekspozycja na światło sztuczne poprzedzająca sen lub trwająca wiele godzin w porze nocnej, ma negatywny wpływ na zdrowie poprzez pogorszenie jakości snu (Kubota i in. 1998), zmniejszenie ilości snu w ciągu doby (Gradisar i in. 2013), wydłużenie czasu oczekiwania na sen (Komada i in. 2000; Brunborg i in. 2011) i skrócenie okresu snu nocnego (van De Bulck i Viewling 2004) oraz pogłębienie problemów z bezsennością (Obayashi i in. 2014; Zimmerman i in. 2019). Zaobserwowano też występowanie zależności między trudnością z zaśnięciem i długością ekspozycji na sztuczne światło przed snem (Gradisar i in. 2013).

Światło obecne we wczesnych godzinach porannych skraca sen i przyspiesza fazę aktywności. Natomiast wieczorna ekspozycja opóźnia porę zasypiania, co przy zachowaniu tej samej pory rozpoczęcia dziennej aktywności spowoduje skrócenie snu nocnego i podejmowanie aktywności dziennej bez odpowiednio wysokiego poziomu czujności. W eksperymencie, którego celem było porównanie skutków wynikających z nocnego czytania przez te same osoby tekstu w wersji papierowej i zapisanej na czytniku cyfrowym (e-book) zaobserwowano, że podczas czytania e-booka przez pięć kolejnych nocy nastąpiło wydłużenie latencji snu i obniżona senność podczas czytania, zmniejszenie ilości wydzielanej melatoniny i czasowe opóźnienie jej sekrecji, zaś nazajutrz badani potrzebowali znacznie dłuższego czasu na „poranny rozruch” (Chang i in. 2015). Okazało się również, że wystarczy przez jedną noc korzystać przed snem z urządzeń emitujących światło LED, by doświadczyć zaburzeń snu (Green i in. 2017), a przecież zazwyczaj w normalnym życiu korzystanie z mediów cyfrowych nie ogranicza się tylko do jednej nocy.

Nie w każdej sytuacji hamowanie wydzielania melatoniny przez ALAN uważane jest za niekorzystne. Korzystne jest w sytuacjach, gdy ograniczanie senności i utrzymywanie odpowiednio wysokiego poziomu czujności może zapewnić wysoką jakość wykonywanej pracy i bezpieczeństwo ludzi, czyli w zawodach, takich jak np. lekarze, kontrolerzy ruchu lotniczego, piloci, pracownicy elektrowni, górnicy – gdzie praca wykonywana jest przez całą dobę. W 2007 roku opublikowano wyniki badań, których celem było poszukiwanie

takiej ekspozycji na światło, która powodując opóźnienie faz rytmów okołodobowych, byłaby najkorzystniejsza dla redukcji senności i utrzymania czujności osób pracujących w nocy w ciemnym pomieszczeniu (Paul i in. 2007). Porównano wpływ światła o różnej długości fali z niebieskiej części widma, emitowanego w godzinach 24:00–02:00, na wydzielanie melatoniny przez szyszynkę osób pracujących przed ekranem komputera. Źródłem światła były diody LED zamontowane w czterech różnych urządzeniach: wieża oświetleniowa, daszek czapki, lampa *Litebook*, okulary LED (ryc. 3). Oceniano u uczestników sprawność psychomotoryczną (czas reakcji, logiczne myślenie, zadania arytmetyczne), poziom senności i dyskomfortu dla oczu. Wszystkie zastosowane źródła światła hamowały wydzielanie melatoniny i powodowały opóźnienie faz rytmu aktywności, wpływając w niewielkim stopniu na wydajność wykonywanych zadań. Najlepszym urządzeniem do praktycznego zastosowania okazała się wieża oświetleniowa, znacząco zmniejszająca senność i wywołująca stosunkowo najmniejszy dyskomfort dla oczu (Paul i in. 2007).



Ryc. 3. Hamowanie syntezy szyszynkowej melatoniny przez światło niebieskie, emitowane przez różne urządzenia w eksperymencie oceniającym wpływ światła na poziom czujności osób pracujących w nocy (modyfikacja na podstawie Paul i in. 2007).

Powyższe badania to przykład działań podejmowanych w przemyśle głównie z myślą o utrzymaniu wysokiej jakości i wydajności produkcji, choć w niektórych przypadkach jak np. praca na oddziałach intensywnej terapii, motywacją do działań jest też troska o ograniczenie ryzyka popełnienia błędu lekarskiego i bezpieczeństwo pacjenta.

W poprzednich latach, gdy do oświetlenia pomieszczeń w nocy stosowano „klasyczne” źródła światła, jego negatywny wpływ na zdrowie pracujących w nocy upatrywano głównie w baraku spójności czasowej między naturalnym dobowym cyklem światło-ciemność z rytmem aktywności sen-czuwanie. Jak bardzo jest to szkodliwe dla zdrowia wykazano w wielu badaniach, przeprowadzonych w różnych grupach osób pracujących w systemach rotacyjnych obejmujących zmiany nocne z pracą wykonywaną w godzinach 24:00–05:00 (Zużewicz i in. 2021).

Skutki wynikające z niewłaściwej relacji między snem i ekspozycją na światło naturalne i sztuczne łącznie, pokazują badania przeprowadzone w grupie stewardess samolotów odbywających loty z przekraczaniem wielu stref czasowych. Wykazano w nich, że trwające wiele dób zmiany wzorca ekspozycji na światło naturalne i sztuczne, chronicznie zakłócające rytmikę okołodobową u ludzi, mogą wpływać także na zaburzenia funkcji poznawczych. Zmieniający się schemat dobowej ekspozycji na światło wymusza konieczność dopasowania endogennej rytmiki okołodobowej do nowych zewnętrznych sygnałów czasowych, aż do osiągnięcia synchronizacji. Zakłócanie tej synchronizacji trwające zbyt długo albo powtarzające się zbyt często wywołuje stres osłabiający fizycznie i psychicznie, wpływający negatywnie na stan zdrowia (Cho 2001). W ślinie stewardess narażonych na długotrwałe, powtarzające się *jet-lag* stwierdzono podwyższony poziom kortyzolu, wskaźnika stresu i występowania zaburzeń funkcji poznawczych. Wykazano, że u osób ekspozowanych na działanie czynnika wywołującego wzrost poziomu kortyzolu przez 5 lat, następuje zmniejszenie objętości prawego płata skroniowego, a zaburzenia orientacji przestrzennej i pamięci stają się zauważalne. Optymistyczne jest stwierdzenie, że efekt ten może być odwracalny po odpowiednio długim czasie przebywania w warunkach pełnej synchronizacji zegarów biologicznego i astronomicznego (Cho 2001; Gibson i in. 2010).

## **Podsumowanie**

Dla wielu osób rozświetlone latarniami i kolorowymi neonami miasta stanowią miły dla oka i estetyczny element „nocnego krajobrazu”, nawet jeśli jest on pozbawiony równie pięknego widoku rozgwieżdżonego nieba. Oświetlone nocą drogi i posesje dają mieszkańcom przekonanie o większym bezpieczeństwie osobistym. Możliwość dowolnego wydłużenia pory jasnej daje przekonanie o swobodnym decydowaniu o porze aktywności. Te pozytywne wrażenia tłumią postrzeganie sztucznego światła jako zanieczyszczenia środowiska naturalnego zagrażającego zdrowiu człowieka i życiu wielu organizmów. Jednak coraz więcej badań naukowych potwierdza istnienie negatywnych konsekwencji wynikających

z narastającej ingerencji sztucznego światła w życie człowieka, zwierząt i roślin. Powstrzymanie negatywnych skutków ALAN wymaga ustalenia granic stosowania światła sztucznego, aby zgodnie z zasadą „nie szkodzić”, można było przywrócić organizmom nieskażone nocne środowisko życia.

Ponieważ niemożliwe jest całkowite wyeliminowanie z życia sztucznego światła w nocy, to należy ustalić, jakie powinno posiadać cechy (charakterystyka widmowa i natężenie) by maksymalnie ograniczyć negatywne skutki dla człowieka i innych żywych organizmów (Nagashima i in. 2018). Wyniki wielu badań wskazują na potrzebę zwiększenia publicznej świadomości o potencjalnych, negatywnych skutkach zdrowotnych ekspozycji na światło sztuczne w nocy. Istnieją np. programy edukacyjne odradzające używania urządzeń z ekranem cyfrowym na co najmniej dwie godziny przed snem. W celu zmniejszenia szkodliwego wpływu ALAN na sen i zdrowie zaleca się korzystanie z oprogramowania sterującego parametrami światła emitowanego przez ekrany bazujące na technologii LED lub noszenie specjalistycznych okularów, filtrujących światło niebieskie z urządzeń cyfrowych (Rahman i in. 2013).

## Literatura

- Achermann P., Tarokh I., 2014. Human sleep and its regulation. *Kosmos* 63(2): 173–180.
- Brainard G.C., Hanifin J.P., Warfield B., Stone M.K., James M.E., Ayers M., Rollag M., 2015. Short-wavelength enrichment of polychromatic light enhances human melatonin suppression potency. *J Pineal Res* 58(3): 352–361.
- Brainard G.C., Lewy A.J., Menaker M., Frerickson R.H., Miller L., Weleber R.G., Cassone V., Hudson D., 1988. Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers. *Brain Res* 454(1–2): 212–218.
- Bringmann H., 2019. Genetic sleep deprivation: using sleep mutants to study sleep functions, *EMBO Reports*: e46807. DOI:10.15252/embr.201846807.
- Brunborg G.S., Mentzoni R., Molde H., Myrseth H., Skouverøe K., Bjorvatn B., Pallesen S., 2011. The relationship between media use in the bedroom, sleep habits and symptoms of insomnia. *J Sleep Res* 20(4): 569–575.
- Chang A-M., Aeschbach D., Duffy J.F., Czeisler C.A., 2015. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proc Natl Acad Sci* 112(4): 1232–1237.
- Cho K., 2001. Chronic "jet lag" produces temporal lobe atrophy and spatial cognitive deficits. *Nature Neuroscience* 4(6): 567–568.
- Cho Y.M., Ryu S.H., Lee B.R., Kim K.H., Lee E., Choi J., 2015. Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiol Int*, 32(9): 1294–1310.
- Cleary-Gaffney M., Espey B., Coogan A.N., 2022. Association of perceptions of artificial light-at-night, light-emitting device usage and environmental noise appraisal

- with psychological distress, sleep quality and chronotype: A cross sectional study, *Heliyon* 8: e11284.
- Dibner C., Schibler U., Albrecht U., 2010. The mammalian circadian timing system: organization and coordination of central and peripheral clocks. *Annu Rev Physiol* 72: 517–549.
- Falchi F., Bará S., 2023. Light pollution is skyrocketing. Data from citizen scientists reveal a worrying growth in light pollution over the past decade. *Science* 379: 234–235. ISSUE 6629.
- Figueiro M.G., Wood B., Plitnick B., Rea M.S., 2011. The impact of light from computer monitors on melatonin levels in college students. *Neuroendocrinol Lett* 32(2): 158–163.
- Fonken L.K., Aubrecht T.G., Melendez-Fernandez O.H., Weil Z.M., Nelson R.J., 2013. Dim light at night disrupts molecular circadian rhythms and increases body weight. *J Biol Rhythms* 28(4): 262–271.
- Gaggioli G., Maquet P., Schmidt C., Dijk D.J., Vandewalle G., 2014. Neuroimaging, cognition, light and circadian rhythms. *Front Syst Neurosci* 8: 126.
- Gamble A.L., D'Rozario A.L., Bartlett D.J., Williams S., Bin J.S., Grunstein R.R., Marshall N.S., 2014. Adolescent sleep patterns and night-time technology use: Results of the Australian Broadcasting Corporation's big sleep survey. *PLoS ONE* 9(11): e1111700. DOI:10.1371/journal.pone.0111700.
- Gangwisch J., 2014. Invited commentary: Nighttime light exposure as a risk factor for obesity through disruption of circadian and circannual rhythms. *Am J Epidemiol* 180(3): 251–253.
- Gaston K.J., Sánchez de Miguel A., 2022. Environmental impacts of artificial light at night. *Annu Rev Environ Resour* 47:373–398.
- Gibson E.M., Wang C., Tjho S., Khattar N., Kriensfeld L.J., 2010. Experimental "jet lag" inhibits adult neurogenesis and produces long-term cognitive deficits in female hamsters. *PLoS ONE* 5(12): e152676.
- Giebultowicz J.M., 2018. Mechanism of circadian clock: The 2017 Nobel Prize in physiology or medicine. *Kosmos* 67(2): 245–249. DOI:10.36921/kos.2018\_2383.
- Gradisar M., Wolfson A.R., Harvey A.G., Hale L., Rosenberg R., Czeisler C.A., 2013. The sleep and technology use of Americans: Findings from the National Sleep Foundation's 2011 Sleep in America Poll. *J Clin Sleep Med* 9(12): 1291–99.
- Green A., Cohen-Zion M., Haim A., Dagan Y., 2017. Evening light exposure to computer screens disrupts human sleep, biological rhythms, and attention abilities. *Chronobiol Int* 34(7): 855–865.
- Grønli J., Byrkjedal I.K., Bjorvatn B., Nødtvedt O., Hamre B., Pallesen S., 2016. Reading from an iPad or from a book in bed: The impact on human sleep. A randomized controlled crossover trial. *Sleep Med* 21: 86–92.
- Hardeland R., 2014. Melatonin, noncoding RNAs, messenger RNA stability and epigenetics – evidence, hints, gaps and perspectives. *Int J Mol Sci* 15: 18221–18252. DOI:10.3390/ijmn1518221.

- Higuchi S., Motohashi Y., Liu Y., Ahara M., Kaneko Y., 2003. Effects of VDT tasks with a bright display at night on melatonin, core temperature, heart rate, and sleepiness. *J Appl Physiol* 94: 1773–1776.
- Higuchi S., Motohashi Y., Liu Y., Maeda A., 2005. Effects of playing a computer game using a bright display on presleep physiological variables, sleep latency, slow wave sleep and REM sleep. *J Sleep Res* 14(3): 267–273.
- Jurkowlaniec E., 2014. Paradoksy snu paradoksalnego. *Kosmos* 62(2): 181–187.
- Kloog I., Haim A., Stevens R., Portnov B., 2009. Global codistribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiol Int* 26(1): 108–125.
- Komada Y., Tanaka H., Yamamoto Y., Shirakawa S., Yamazaki K., 2000. Effects of bright light pre-exposure on sleep onset process. *Psychiatry Clin Neurosci* 54(3):365–366.
- Kozaki T., Kubokawa A., Taketomi R., Hatae K., 2015. Effect of day-time exposure to different light intensities on light induced melatonin suppression at night. *J Physiol Anthropol* 34:1–5. DOI:10.1186/s40101-015-0067-1.
- Kubota T., Uchiyama M., Hirokawa G., Ozaki S., Hayasi M., Okawa M., 1998. Effects of evening light on body temperature. *Psychiatry Clin Neurosci* 52(2): 248–249.
- Kyba C., Altintas Y.Ö., Walker C.E., Newhouse M., 2023, Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science* 379(6629): 265–268.
- Lack L.C, Wright H.R., 2007. Chronobiology of sleep in humans. *Cell Mol Life Sci* 64: 1205–1215. DOI:10.1007/s00018-007-6531-2.
- Markus R.P., Sousa K.S., da Silveira Cruz-Machado S., Fernandes P.A., Ferreira Z.S., 2021. Possible role of pineal and extra-pineal melatonin in surveillance, immunity, and first-line defense. *Int J Mol Sci* 22: 12143. DOI:10.3390/ijms222212143.
- McFadden E., Jones M.E., Schoemaker M.J., Ashworth A., Swerdlow A.J., 2014. The relationship between obesity and exposure to light at night: cross-sectional analyses of over 100,00 women in the Breakthrough Generations Study. *Am J Epidemiol* 180(3): 245–250. DOI:10.1093/aje/kwu117.
- Møller M., Baeres F.M.M., 2002. The anatomy and innervation of the mammalian pineal gland. *Cell Tissue Res* 309:139–150. DOI:10.1007/s00441-002-0580-5.
- Münch M., Kriebitzsch S., Steiner R., Oelhafen P., Wirz-Justice A., Cajochen C., 2006. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integ Comp Physiol* 290(5): R1421–R1428.
- Nagashima S., Osawa M., Matsuyama H., Ohoka W., Ahn A., Wakamura T., 2018. Bright-light exposure during daytime sleeping affects nocturnal melatonin secretion after simulated night work. *Chronobiol Int* 35(2): 229–239.
- Navara K.J., Nelson R.J., 2007, Mini review: The dark side of light at night: Physiological, epidemiological, and ecological consequences, *J Pineal Res* 43: 215–224. DOI:10.1111/j.1600-079X.2007.00473.x.
- Obayashi K., Saeki K., Kurumatani N., 2014. Association between light exposure at night and insomnia in the general elderly population: The HEIJO-KYO cohort. *Chronobiol Int* 31(9): 976–982.



- Paul M.P., Miller J.C., Gray G., Buick F., Blazeski S., Arendt J., 2007. Circadian phase delay induced by phototherapeutic. *Aviat Space Environ Med* 78(7):645–652.
- Rahman S., Shapiro C., Wang F., Ainlay H., Kazmi S., Brown T., Casper R., 2013. Effects of filtering visual short wavelengths during nocturnal shiftwork on sleep and performance. *Chronobiol Int* 30(8): 951–962.
- Reiter R.J., 1993. The melatonin rhythm: both a clock and a calendar. *Experientia* 49: 654–664.
- Reiter R.J., Tan D.X., Erren T.C., Fuentes-Broto L., Paredes S.D., 2009. Light-mediated perturbations of circadian timing and cancer risk: A mechanistic analysis. *Integr Cancer Ther* 8: 354–360.
- Roenneberg T., Kantermann T., Juda M., Vetter C., Allebrandt K., 2013. Light and the human circadian clock. *Handbook of Experimental Pharmacology*. DOI:10.1007/978-3-642-25950-0\_13.
- Skwarło-Sońta K., 2023. Achieving healthy aging in the light-polluted world. [in:] Jagota A. (ed.), *Sleep and Clocks in Aging and Longevity*, Springer Nature Switzerland AG: 445–459. DOI:10.1007/978-3-031-22468-3\_21.
- Skwarło-Sońta K., Zużewicz K. 2019. Chronotyp kontra zanieczyszczenie świetlne – nadzieja na ograniczenie negatywnych skutków pracy zmianowej? [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa: 9–25.
- Skwarło-Sońta K., Zużewicz K., 2022. Light pollution as a possible factor disturbing balanced bat-virus relationships, 2nd International Conference on Environmental and Astronomical Light Pollution, EALPO 2022, Niepołomice, Poland September 2–3, 2022, *Abstract Book*: 26.
- Stehle J.H., Saade A., Rawashdeh O., Ackermann K., Jilg A., Sebesteny T., Maronde A., 2011. A survey of molecular details in the human pineal gland in the light of phylogeny, structure, function and chronobiological diseases. *J Pineal Res* 51: 17–43. DOI:10.1111/j.1600-079X.2011.00856.x.
- Stevens S.R., 2009. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: Assessment of existing evidence. *Int J Epidemiol* 38(4): 963–970.
- Stevens R.G., Brainard G.C., Blask D.E., Lockley S.W., 2014. Circadian disruption from electric lighting in the modern world. *Cancer J Clin* 64(3): 207–218.
- Turek F.W., Gillette M.U., 2004. Melatonin, sleep, and circadian rhythms: Rationale for development of specific melatonin agonists. *Sleep Med* 5: 523–532.
- West K., Jablonski M., Warfield B., Cecil K., James M., Ayers M., Maida J., Bowen C., Sliney D., Rollag M., 2011. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans. *J Appl Physiol* 110: 619–626.
- Wood B., Rea M.S., Plitnick B., Figueiro M.G., 2012. Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. *Appl Ergonomics*: 1–4. DOI:10.1016/j.apergo.2012.07.008.
- van De Bulck J., Viewing T., 2004. Computer game playing, and internet use and self-reported time to bed and time out of bed in secondary-school children. *Sleep* 27(1): 101–104.

- van Maanen A., Meijer A.M., van der Heijden K.B., Oort F.J., 2015. The effects of light therapy on sleep problems: A systematic review and meta-analysis. *Sleep Med Rev* 29: 52–62.
- Xiao Q., Gee G., Jones RR, Jia P, James P, Hale L., 2020. Cross-sectional association between outdoor artificial light at night and sleep duration in middle-to-older aged adults: the NIH-AARP diet and health study. *Environ Res* 180: 108823. DOI:10.1016/j.envres.2019.108823.
- Yang W., Deng Q., Fan W., Wang W., Wang X., 2014. Light exposure at night, sleep duration, melatonin, and breast cancer: A dose-response analysis of observational studies. *Eur J Cancer Preven* 23(4): 269–276.
- Zhu X., Gao M., Cheng X., Zhao W., 2023. Sleep – the guarantee of health! Does the environmental perception characteristics of urban residential areas affect residents' sleep quality? *Front Public Health* 10: 1017790. DOI:10.3389/fpubh.2022.1017790.
- Zimmerman M.E., Kim M.B., Hale C., Westwood A.J., Brickman A.M., Shechter A., 2019. Neuropsychological function response to nocturnal blue light blockage in individuals with symptoms of insomnia: a pilot randomized controlled study. *J Int Neuropsychol Soc* 25(7): 668–677.
- Zużewicz K., Prędecka A., Zużewicz M.A., 2021. *Zrozumieć pracujących w nocy. Elementy chronofizjologii*. Wyd. SGSP, Warszawa.

## **Streszczenie**

Sztuczne światło obecne w niewłaściwej porze, ilości i temperaturze barwowej, stwarzając ludziom warunki do prowadzenia stylu życia określanego jako 24/7, wpływa niekorzystnie na różne procesy życiowe. Wśród nich czołowe miejsce zajmują zaburzenia snu, na które cierpi coraz większy odsetek ludzi a bezsenność dotyka nawet  $\frac{3}{4}$  naszej populacji. Celem prezentowanego doniesienia jest przegląd piśmiennictwa, dotyczącego istnienia zależności między skażeniem świetlnym a jakością snu ludzi, której miarą jest zarówno czas trwania jak i „wzorzec”, związany ze snem w ciągu tygodnia pracy/nauki vs dni wolne od rutynowych obowiązków. Osiągnięcie tego celu było możliwe przez porównanie dostępnych wyników badań populacyjnych z tymi, których dostarczają pomiary przeprowadzane w kontrolowanych warunkach. Zaletą badań populacyjnych jest analiza zależności obserwowanych w dużych grupach uczestników, jednak ich słabą stroną jest konieczność opierania się na raczej przybliżonej ocenie jasności nocy przez systemy geofizyczne. Można je jednak podbudowywać wynikami pomiarów prowadzonych w układach kontrolowanych, kiedy monitorowana jest jasność/ciemność nocy oraz rytm dobowy syntezy melatoniny i jego zaburzenia przez obecność światła w nocy. Jednak w każdym przypadku wyniki wskazują, że zarówno długość okresu snu jak i jego jakość są znacznie gorsze w warunkach skażenia światłem, a towarzyszące komplikacje w przebiegu wielu procesów fizjologicznych są często pochodną zakłócenia nocnej syntezy melatoniny. Wnioski płynące z omawianych obserwacji są jednoznaczne: światło w nocy, powodujące zaburzenia rytmu dobowego syntezy melatoniny i jakości snu człowieka, jest silnym, nowym czynnikiem stresowym dla naszego systemu okołodobowego, który wyewoluował w warunkach regularnie po sobie następujących okresów światła i ciemności. Nikt nie jest w stanie przewidzieć długoterminowych konsekwencji takiej sytuacji, która wymaga podjęcia energicznych działań naprawczych.

**Słowa kluczowe:** ALAN, sen, zegar biologiczny, melatonina, zdrowie.

## **The influence of ALAN on the rhythm of sleep and wakefulness and human health**

### **Summary**

Artificial light present in the wrong time, quantity, and in inadequate color temperature, by creating conditions for people to lead a lifestyle known as 24/7, adversely affects various life processes. Among them, the leading place is occupied by sleep disorders that affect an increasing proportion of human population and up to 3/4 of us complains of insomnia. The purpose of this article is to review the literature on the relationships between light pollution and people's quality of sleep, measured by both the duration and the "pattern" of sleep during the work/study week vs. days off from routine duties. Achieving this goal was possible by comparing the available results of population studies with those provided by measurements carried out under controlled conditions. The advantage of population studies is the analysis of relationships in large groups of participants, but their weakness is to rely on a rather approximate assessment of the night brightness by geophysical systems. Nevertheless, they can be supported by the measurements carried out in controlled systems, when the brightness/darkness of night and the circadian rhythm of melatonin synthesis, and its disturbance by the presence of light at night are monitored. In each case the results are unambiguous: both the length of sleep period and its quality are much worse under conditions of light pollution and associated complications in the numerous physiological processes are frequently resulting from the disturbance of nocturnal melatonin synthesis. Conclusions drawn from the discussed observations are clear: light at night, resulting in the disorders in the circadian rhythm of melatonin synthesis and quality of human sleep, is a powerful new stressor for our circadian system, which has evolved in conditions of regular periods of light and dark, i.e. days and nights. No one can predict the long-term consequences of such a situation, which requires vigorous reparative actions.

**Key words:** ALAN, sleep, biological clock, melatonin, health.

### **Dane kontaktowe autorek:**

**Krystyna Skwarło-Sońta**

Uniwersytet Warszawski

Wydział Biologii

e-mail: k.skwarlo-sont@uw.edu.pl

**Krystyna Zużewicz**

emerytowany pracownik naukowy

e-mail: zuzewicz.krystyna@gmail.com



**Widok na Kopernikański Ośrodek Integracji (KOI) położony w tzw. lasku bielańskim na terenie kampusu Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (fot. Mieczysław Kunz)**

Anna Kołton, Monika Czaja

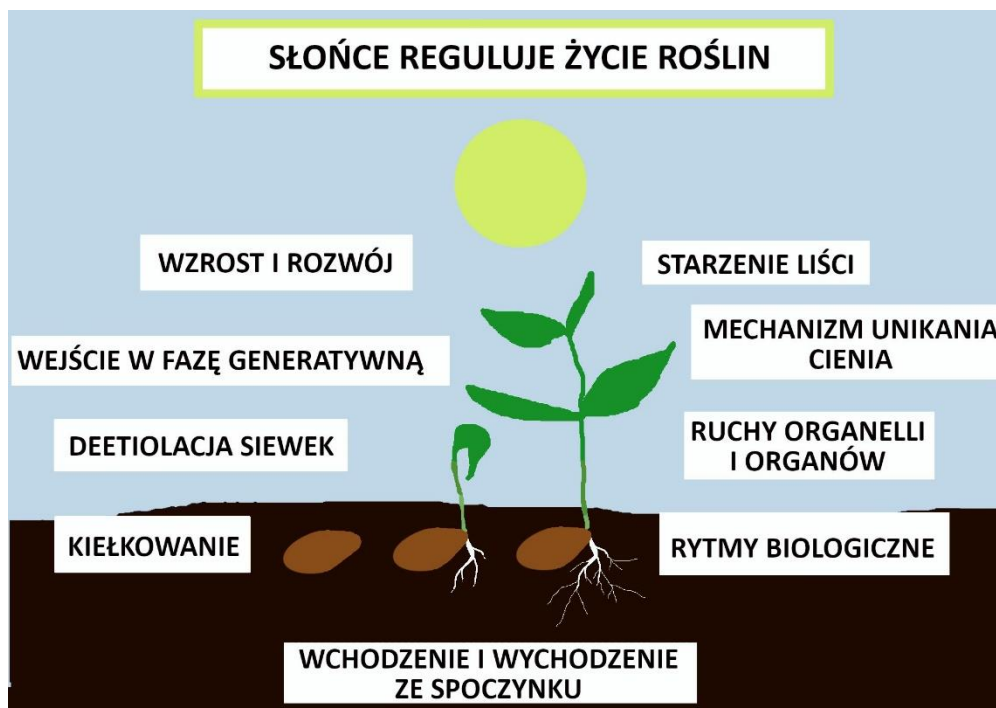
## Oddziaływanie zanieczyszczenia światłem na rośliny – co wiemy i czego się spodziewamy

### Wprowadzenie

Wiele czynników zewnętrznych wpływa na wzrost i rozwój roślin, i są one zmienne nie tylko na przestrzeni roku, ale także w obrębie kilku miesięcy czy nawet jednego dnia. Należą do nich: temperatura, wilgotność powietrza i gleby, zasobność w składniki pokarmowe czy dostęp do światła na danym stanowisku. Elementem stale powtarzającym się w regularnych cyklach w przyrodzie jest natomiast fotoperiod, czyli następujące po sobie okresy dnia i nocy – światła i ciemności. Na skutek intensywnej urbanizacji, a w tym rozwoju oświetlenia infrastruktury drogowej, mieszkaniowej i przemysłowej, nastąpiło zaburzenie naturalnych okresów ciemności. Jak dowodzą liczne badania, okresy te są niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych, zarówno zwierząt (w tym ludzi) jak i roślin. Długofalowe skutki zaburzenia naturalnego cyklu dostępu do światła i ciemności u roślin nie są dotąd poznane. Liczne badania koncentrowały się do tej pory na pozytywnym wpływie światła na rośliny w związku z jego kluczową rolą w procesie fotosyntezy. Ponadto, badano także wpływ światła jako bodźca do przeprowadzania licznych procesów, po odbiorze przez konkretne receptory. Światło stanowi dla roślin nie tylko bezpośrednie źródło energii, ale także jest źródłem, uczestniczącej w regulacji licznych procesów związanych z życiem roślin (ryc. 1).

Rozpatrując wpływ światła na rośliny należy uwzględnić zarówno jego natężenie, skład spektralny, kierunek padania, jak i długość okresu światła i ciemności w cyklu okołodobowym (Kołton i in. 2021). W procesie fotosyntezy, największą rolę pełni światło barwy niebieskiej i czerwonej. Wiązki światła

o określonej barwie odbierane są przez wyspecjalizowane fotoreceptory, w przypadku fotosyntezy kluczową rolę pełnią tu chlorofile oraz karotenoidy (Bennie i in. 2016). Ponadto, w tkankach roślin występuje szereg receptorów regulujących wiele innych procesów związanych ze wzrostem i rozwojem roślin – określanych wspólnie jako fotomorfogeneza (Galvão i Fankhauser 2015; Paik i Huq 2019).



Ryc. 1. Aspekty życia roślin regulowane przez światło.

W ciągu naturalnego cyklu dobowego natężenie światła słonecznego jest zmienne, a dodatkowo wpływa na nie stopień zachmurzenia. W nocy natomiast nie możemy mówić o całkowitej ciemności, ze względu na obecność światła gwiazd i odbitego przez księżyc. Ogólnie jednak, ze względu na cyklicznie zmieniające się wzajemne położenie słońca i ziemi sprawia, że dostęp do energii słonecznej podlega stałym prawidłowościom. W naszej strefie klimatycznej, podczas miesięcy letnich natężenie promieniowania słonecznego jest wyższe niż w zimie. W ciągu dnia natężenie to jest coraz większe aż do kulminacji w godzinach południowych, a następnie słabnie aż do zmierzchu. Po zmierzchu natężenie promieniowania jest bardzo niskie. Zarówno natężenie, jak i skład spektralny światła podlegają zmianom w cyklu okołodobowym, a także w cyklu rocznym (Brelsford i in. 2019). Warto podkreślić, że o ile do prawidłowego przebiegu fotosyntezy natężenie światła powinno wynosić około  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  i więcej, to do odbioru bodźca świetlnego jako sygnału regulującego wystarczy

natężenie na poziomie  $0,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (a czasem nawet mniej) (Franklin i in. 2005; Kołton i in. 2021).

W wyniku intensywnego rozwoju miast i związanej z nimi infrastruktury drogowej i mieszkaniowej warunki wzrostu roślin uległy znacznemu pogorszeniu. Rozbudowa tego typu elementów wpływa na zaburzenie dostępności wody i powietrza w glebie, brak wystarczającej ilości składników pokarmowych, ekstremalnie wysokie temperatury powietrza i gleby, zanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego, uszkodzenia mechaniczne, a także brak wystarczającego miejsca do rozwoju (Czaja i in. 2020). Coraz częściej dostrzeganym problemem stało się także zanieczyszczenie światłem, które zaburza naturalnie występujące okresy ciemności. Zjawisko to powodowane jest zarówno przez oświetlenie uliczne, fasadowe, światła samochodów, billboardy, wystawy sklepowe, a także światło „uciekające” z okien budynków mieszkalnych. Z powodu intensywnego oświetlenia miast obserwujemy obecnie zjawisko zwane „łuną miejską”, widoczną z odległości kilkudziesięciu kilometrów (Czaja i Kołton 2022). Badania przeprowadzone na terenie Krakowa wykazały, że w miejscach pozornie pozbawionych dostępu do źródeł sztucznego światła, gęstość strumienia fotonów (istotna w przypadku pomiarów intensywności fotosyntezy) waha się w granicach  $0,2\text{--}1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (badania własne, Tabela 1). W pobliżu lamp natomiast, na wysokości około 2 metry od ziemi, wartości te wahały się między  $2\text{--}4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (180–250 lx).

Tabela 1. Pomiary własne natężenia światła w różnych miejscach na terenie Krakowa, wykonane przy użyciu spektrometri SpectraPen mini (PSI, Czechy).

Miejsce pomiaru	Gęstość strumienia fotonów [ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Natężenie światła [lx]
Planty Krakowskie (pomiar w połowie odległości między lampami)	0,2	13
Rynek Główny (pomiar pomiędzy lampami)	0,5	12
Plac Matejki (pomiar pomiędzy lampami)	0,9	90
Kampus UR (pomiar pod lampą LED na wysokości 2 m)	2,5	180
Planty Krakowskie (pomiar pod lampą na wysokości 2 m)	3,8	250
Rynek Główny (pomiar pod lampą na wysokości 2 m)	4,1	190

W ostatnich latach, w wyniku poszukiwań oszczędności, coraz bardziej popularne stało się oświetlenie typu LED, charakteryzujące się mniejszym zużyciem energii w porównaniu do tradycyjnych żarówek sodowych. Ze względu



na parametry lamp typu LED zwiększa się natomiast jasność nocnego nieba, a także udział światła o barwie niebieskiej, które z kolei ma znaczący wpływ na rośliny (Tabaka 2021). W wyniku zwiększania poczucia bezpieczeństwa mieszkańców miast, przy jednoczesnym poszukiwaniu oszczędności dla budżetu, nieintencjonalnie zaburzone zostają naturalne fazy ciemności, które są ważnym czynnikiem w życiu roślin. Zanieczyszczenie światłem powstające głównie w obrębie terenów silnie zurbanizowanych, będzie także oddziaływać na rośliny w terenach pozamiejskich (łąki, pastwiska, lasy, pola), ze względu na naturę światła (fala) i jego łatwe rozchodzenie się na duże odległości. Dlatego istnieje potrzeba poszerzania wiedzy o reakcjach roślin na zanieczyszczenie światłem. Dostępne wyniki badań dają jedynie okrojony obraz wpływu zanieczyszczenia światłem na wzrost i rozwój roślin, obawiamy się jednak, że wpływ ten może mieć kluczowe znaczenie dla życia roślin w najbliższych latach.

## **Co wiemy o wpływie zanieczyszczenia światłem na rośliny?**

### **Zmiany fenologiczne**

Cyklicznie powtarzające się fazy rozwoju roślin związane ze zmianami pór roku nazywamy fenologią. Ze względu na różnice zachodzące w rozwoju roślin na początku sezonu wegetacyjnego i pod jego koniec, warto zwrócić uwagę na zmiany fenologiczne wiosenne i jesienne (Vilhar i in. 2013). Zmiany te, kontrolowane są przez długość dnia, temperatury dnia i nocy oraz zmiany molekularne (Roxas i in. 2021). W związku z ocieplaniem klimatu obserwuje się postępujące wydłużanie sezonu wegetacyjnego, związane z wcześniejszym rozwojem pąków wiosną i późniejszym zrzucaniem liści jesienią (Hänninen i in. 2019). Zjawisko to może być korzystne dla mieszkańców miast ze względu na dłuższy czas akumulacji szkodliwych związków przez blaszki liściowe czy zapewnianie cienia. Z drugiej strony jednak zaburzenie naturalnych pór rozwoju i starzenia liści może narazić je na uszkodzenia w wyniku przymrozków pojawiających się wiosną lub jesienią (Bigler i Bugmann 2018). Ponadto, nietypowe pory rozwoju poszczególnych organów roślin wpływają na zakłócenie naturalnych interakcji między roślinami a zwierzętami, jak choćby koniecznego pojawienia się w jednym czasie kwiatów i dorosłych form zapylaczy (Forrest 2014). Głównym czynnikiem regulującym wiosenną fenologię – w tym rozwój pąków – jest temperatura (Way i Montgomery 2015). Kolejnym czynnikiem regulującym wiosenny rozwój roślin jest fotoperiod, który w związku ze wspomnianym ocieplaniem klimatu, wydawał się dotychczas bardziej stabilnym parametrem. Ze względu na coraz szerszy zasięg zanieczyszczenia światłem, mamy do czynienia z zaburzeniem kolejnego czynnika regulującego wzrost i rozwój roślin. Badania prowadzone na terenie

Wielkiej Brytanii na przestrzeni 13 lat wykazały, że w miejscach intensywnie oświetlanych nocą, rozwój pąków wiosną był przyspieszony nawet o 7,5 dnia (Ffrench-Constant i in. 2016). Warto podkreślić, że wrażliwość roślin na ten czynnik jest zależna od gatunku. Wykazano, że dodatek światła o barwie niebieskiej do oświetlenia dziennego spowodował szybszy rozwój pąków wiosną o 3 dni w przypadku brzozy brodawkowatej (*Betula pendula*), ale aż o 6 dni w przypadku dębu szypułkowego (*Quercus robur*) i olszy czarnej (*Alnus glutinosa*) (Brelsford i Robson 2018). Oświetlenie roślin w czasie nocy wpływa zarówno na przyspieszenie pęknięcia pąków, jak i tempo rozwoju liści. W badaniach przeprowadzonych w warunkach kontrolowanych, na 4 gatunkach drzew i 4 gatunkach krzewów, rośliny oświetlane nocą światłem o natężeniu  $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  wykazały szybsze pęknięcie pąków nawet do 10 dni i szybszy rozwój liści aż do 20 dni w porównaniu do kontroli (12h –  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  i 12h ciemności) (Czaja i Kołton 2022). Również w tym badaniu wykazano różnice gatunkowe. W warunkach zanieczyszczenia światłem pęknięcie pąków było przyspieszone od o minimum 2 dni – u tawuły szarej (*Spiraea xcinerea* 'Grefsheim'), do 10 dni – u klonu polnego (*Acer campestre*) (ryc. 2). Rozwój liści natomiast był przyspieszony od o minimum 4 dni – u suchodrzewu chińskiego (*Lonicera pileata*), aż do 20 dni u złotlinu japońskiego (*Kerria japonica*).



Ryc. 2. Przyspieszenie rozwoju pąków klonu polnego po 24 dniach traktowania zanieczyszczeniem światłem (po prawej stronie) w porównaniu do kontroli (po lewej stronie).

Wcześniejszy rozwój liści wiosną może być postrzegany jako czynnik korzystny ze względu na walory estetyczne oraz szybsze świadczenie wszelkich usług ekosystemowych przez blaszki liściowe. Należy jednak podkreślić, że niesie to ryzyko uszkodzenia młodych i wrażliwych liści podczas spóźnionych wiosennych przymrozków. W konsekwencji takie uszkodzenia prowadzą do osłabienia całej rośliny i mogą wpłynąć nie tylko na jej słabszy wzrost i rozwój w sezonie, ale także na ogólny stan zdrowotny i długość życia.



Ryc. 3. Opóźnienie starzenia i opadania liści jesienią u brzozy brodawkowatej (*Betula pendula*) w pobliżu oświetlenia chodnika na osiedlu Cegielniana w Krakowie (02.12.2022 r.)

Jesienne zmiany fenologiczne związane są ze starzeniem liści i przygotowaniem do okresu spoczynku zimowego, m.in. przez translokację związków organicznych do organów magazynujących. Sygnałem dla roślin do rozpoczęcia tych zmian i zakończenia intensywnego wzrostu jest skracający się dzień (Lagercrantz 2009). Również w tym przypadku współdziałają ze sobą różne czynniki środowiskowe, głównie obniżająca się temperatura i coraz krótszy dzień (Panchen i in. 2015; Brelsford i in. 2019). Opóźnienie jesiennego starzenia liści niektórych gatunków w pobliżu lamp łatwo zaobserwować gołym okiem (ryc. 3). Zakłócenie informacji dotyczącej zmiany pór roku może skutkować nieprawidłowym wycofywaniem związków zapasowych, co w konsekwencji będzie osłabiać rośliny wchodzące w trudny okres zimowy. Przełom listopada i grudnia to czas, kiedy spodziewamy się już pierwszych przymrozków, liście które pozostają w tym czasie na pędach opadną nagle, bez przejścia łagodnego i naturalnego procesu starzenia (ryc. 3 i 4).



Ciekawe badania przeprowadzone na terenie miasta Zvolen na Słowacji, opisują reakcje dwóch gatunków drzew uważanych za wrażliwe na zmiany fotoperiodu – klon jawor (*Acer pseudoplatanus*) i sumak octowiec (*Rhus typhina*) (Škvareninová i in. 2017). W związku z zanieczyszczeniem światłem doszło do opóźnienia inicjacji jesiennego starzenia liści nawet o 22 dni, a cały proces był dłuższy nawet o 9 dni. Oświetlone części koron tych samych osobników zrzucały liście później o 6–7 dni w porównaniu do części korony dalszej od źródła światła. Wspomniane zmiany są ściśle zależne od gatunku. Warto jednak podkreślić, że na temat wrażliwości na fotoperiod niektórych gatunków wciąż można znaleźć w literaturze sprzeczne informacje (zobacz przegląd literatury, zwłaszcza Way i Montgomery 2015). Stąd konieczność podejmowania precyzyjnych badań w tym zakresie. Znajomość wrażliwości roślin na zmiany fotoperiodu, a zatem i na zanieczyszczenie światłem pozwoli ogrodnikom i zarządcom zieleni na bardziej zrównoważone planowanie nasadzeń.



Ryc. 4. Opóźnienie starzenia i opadania liści jesienią u kasztanowca pospolitego (*Aesculus hippocastanum*) na Plantach Krakowskich (27.11.2021 r.).

### **Otwieranie aparatów szparkowych**

Podczas słonecznego dnia w trakcie okresu wegetacji, aparaty szparkowe powinny być otwarte umożliwiając wymianę gazową, w tym parowanie wody z tkanek, przy okazji schładzając powierzchnię liści. W nocy proces ten zachodzi

w mniejszym stopniu, pozwalając roślinie na „odpoczynek” i regenerację. Zanieczyszczenie światłem może powodować zaburzenia w ruchach aparatów szparkowych np. otwieranie ich także w nocy (Kwak i in. 2017). Autorzy wykazali, że aparaty szparkowe tulipanowca amerykańskiego (*Liriodendron tulipifera*) były mniejsze oraz charakteryzowały się zaburzeniami w ruchach pod wpływem zanieczyszczenia światłem. W innej pracy przedstawiono, że zarówno światło niebieskie jak i czerwone pełnią istotną rolę w regulacji otwierania aparatów szparkowych (Shimazaki i in. 2007), przy czym natężenie światła nie musi być duże, wystarczy już  $1-10 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Chen i in. 2012). Istotnym procesem regulowanym przez światło, wpływające na otwieranie aparatów szparkowych jest transpiracja. Proces ten zachodzi przez całą dobę, jednak w nocy jego intensywność jest znacznie mniejsza niż w dzień. Transpiracja w nocy stanowi zwykle mniej niż 1/4 wartości mierzonej w ciągu całej doby (Caird i in. 2007; Fricke 2019). Na podstawie pomiarów przeprowadzonych na terenie Krakowa (Tabela 1) możemy wnioskować, że wiele drzew i krzewów jest narażonych na wydłużony czas otwarcia aparatów szparkowych. Taki stan rzeczy będzie skutkował zwiększoną utratą wody, co w przypadku warunków miejskiej suszy jest szczególnym zagrożeniem dla roślin (Kołton i in. 2021). Dodatkowo otwarte aparaty szparkowe to miejsce wnikania zanieczyszczeń i patogenów. Zdolność do zamykania aparatów szparkowych wiąże się z istotnym mechanizmem obronnym roślin przeciw patogenom (Melotto i in. 2017).

### **Kwitnienie**

Zdolność do przejścia rośliny z fazy wegetatywnej w generatywną i wytwarzania kwiatów jest szeroko regulowana przez czynniki wewnętrzne organizmu oraz czynniki środowiska zewnętrznego. Wiele hipotez sugeruje, że przejście do fazy generatywnej jest związane z uruchomieniem genów kwitnienia. Jednak nie do końca wyjaśniono jak i dlaczego te geny są uruchamiane, a ponadto świat roślin jest bardzo zróżnicowany gatunkowo pod względem czynników wyzwalających kwitnienie. Generalnie można podzielić rośliny na autonomiczne, które przechodzą w stan generatywny bez udziału bodźców zewnętrznych oraz wrażliwe na bodźce zewnętrzne, których działanie jest niezbędne do indukcji kwitnienia (Jin i in. 2021).

Kontrola czasu kwitnienia roślin jest istotna ze względu na możliwość skutecznego rozmnażania. Jeśli kwitnienie następuje za wcześnie w trakcie sezonu, może dochodzić do uszkodzeń mrozowych lub niezgodności czasowej z zapyłaczami. Jeżeli kwitnienie następuje za późno, to może być za mało czasu do właściwego wytworzenia nasion i odpowiedniego ich rozprzestrzenienia

przed końcem okresu wegetacji, ewentualnie narazi młode siewki na uszkodzenia mrozowe (Gaudinier i Blackman 2019).

Światło może wpływać na kwitnienie roślin poprzez jego ilość, jakość i długość okresów światła i ciemności w cyklu dobowym (Thomas 2006). Biorąc pod uwagę fotoperiod (długość okresów światła i ciemności w cyklu dobowym) rośliny możemy podzielić na: rośliny dnia długiego, zakwitające gdy okres światła w cyklu dobowym osiąga odpowiednią długość; rośliny dnia krótkiego, które zakwitają przy krótkim okresie światła w ciągu doby i odpowiednio długiej i nieprzerwanej nocy oraz rośliny neutralne (Yeang 2013).

Zarówno rośliny długiego jak i krótkiego dnia narażone na zanieczyszczenie światłem w nocy będą mieć zaburzony odbiór fotoperiodu, a więc orientację o porze roku, a to może przekładać się na zmianę terminu kwitnienia. Jedynie rośliny obojętne na długość dnia nie powinny wykazywać zaburzonego momentu rozwoju pąków kwiatowych. W badaniach prowadzonych na trzech gatunkach traw poddanych zanieczyszczeniu światłem, zaobserwowano zaburzenie rozpoczęcia kwitnienia nawet do 12 dni w porównaniu do roślin pozbawionych źródła światła nocą (Bennie i in. 2018). Traktowanie chryzantemy (*Dendranthema grandiflora*) światłem niebieskim w okresie ciemności (po krótkim dniu) skutkowało opóźnieniem zawiązywania pąków kwiatowych nawet o 11 dni, przy czym nie zatrzymywało inicjacji kwitnienia całkowicie (Park i Jeong 2020). Wskazuje to, że rośliny dnia krótkiego mogą mieć szanse zawiązać kwiaty w trakcie oświetlania w nocy, ale termin kwitnienia będzie mocno przesunięty. Istotnymi gatunkami wrażliwymi na fotoperiod są konopie czy soja (rośliny dnia krótkiego). Aby w pełni wykorzystać gospodarczo rośliny konopi należy zapewnić odpowiedni fotoperiod w trakcie uprawy (Dowling i in. 2021), przy czym zanieczyszczenie światłem w nocy może przerwać krótkodniową indukcję kwitnienia i obniżyć zyski.

Jak wykazały badania własne przeprowadzone na aksamitce wzniesionej (*Tagetes erecta*), oświetlenie nocne nawet o małej intensywności istotnie zaburza kwitnienie roślin w porównaniu do osobników rosnących w warunkach nocy nie zaburzonej oświetleniem. Zanieczyszczenie światłem w nocy opóźniło zawiązywanie kwiatów aksamitki o ponad 20 dni (ryc. 5).

### **Budowa morfologiczna liści**

Światło wpływa na budowę morfologiczną liści roślin. Znane jest zjawisko odmiennej budowy liści drzew z dobrze oświetlonej i ocienionej części korony (Lichtenthaler i in. 1981; Lichtenthaler i in. 2007; Dörken i Lepetit 2018). Zwykle taką odmienną budowę interpretujemy jako dostosowanie do warunków

otoczenia, kiedy rośliny muszą wytwarzać mechanizmy zabezpieczające przed nadmiarem światła (np. dodatkowe warstwy miękiszu czy gromadzenie antocyjanów) lub wprowadzać strategie lepszego wykorzystania niskich dawek światła (zwiększenie powierzchni blaszki liściowej) (Roeber i in. 2021). Istnieją też doniesienia, które wskazują, że 24 godzinne oświetlenie roślin modyfikuje budowę i funkcjonowanie liści (Warrington i Norton 1991; Equiza i in. 2006; Pham i in. 2019). Wykazano także odmienną budowę liści klonu jawora i dławisza okrągłolistnego pod wpływem zanieczyszczenia światłem w nocy w porównaniu do roślin nie oświetlanych po zmierzchu (Kołton i in. 2022). Zanieczyszczenie światłem spowodowało zmniejszenie powierzchni oraz zwiększenie grubości blaszki liściowej u badanych gatunków. Takie zmiany mogą wpływać na funkcjonowanie liści oraz wymianę gazową, ale także na szybkość ich starzenia – wymaga to jednak dalszych szczegółowych badań.



Ryc. 5. Opóźnienie rozwoju pąków kwiatowych aksamitki wyniosłej pod wpływem zanieczyszczenia światłem.

## **Spodziewane efekty oddziaływania zanieczyszczenia światłem na rośliny**

Problem zanieczyszczenia światłem rośnie z roku na rok (Kyba i in. 2023), co jednocześnie wiąże się z szerokim zainteresowaniem tym zjawiskiem naukowców z różnych dziedzin. Mimo, że liczba publikacji dotyczących tego zanieczyszczenia środowiska jest całkiem imponująca to wydaje się, że badania wpływu tego zagrożenia rośliny są ciągle jeszcze ograniczone. A przecież wiemy, że światło jako czynnik zewnętrzny wpływający na rośliny może stanowić zagrożenie (Roeber i in. 2021; Kołton i in. 2022). Jednym z zagrożeń dla rośliny związanych ze światłem jest zaburzenie fotoperiodu. Dlatego szukając informacji o wpływie zanieczyszczenia światłem na funkcjonowanie tej grupy organizmów warto także przejrzeć wyniki badań na roślinach modelowych (rzodkiewnik, pomidor, kapusta, ryż, soja, kukurydza i in.) dotyczących syndromu zaburzenia fotoperiodu czy reakcji na 24h oświetlenie w cyklu dobowym (Roeber i in. 2021). Te prace często prowadzone są w kontrolowanych warunkach uprawy (pokoje wzrostowe, fitotrony, szklarnie) i nie uwzględniają np. zmiennych warunków termicznych, przez co mogą tylko częściowo tłumaczyć obserwowane w naturze zjawiska, ale poszerzają naszą wiedzę w zakresie regulacji biologii roślin przez światło. Mogą też wskazać kierunki zmian, jakich możemy oczekiwać u roślin pod wpływem zanieczyszczenia światłem. Poniżej przedstawiamy kilka aspektów opisywanych w badaniach podstawowych dotyczących fotobiologii roślin, które naszym zdaniem warto w przyszłości brać pod uwagę planując badania wpływu zanieczyszczenia światłem na rośliny.

### **Zmiany w zawartości i aktywności reaktywnych form tlenu**

W trakcie metabolizmu roślin produkowane są reaktywne formy tlenu (RFT) (Mittler 2017; Czarnocka i Karpiński 2018). Cząsteczki te mają wyższą reaktywność niż tlen i mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla komórki, choć warto też podkreślić ich regulacyjną funkcję. W roślinach wykształcił się system antyoksydacyjny, który kontrolując wewnątrzkomórkowy poziom RFT zapewnia jej prawidłowe funkcjonowanie (Czarnocka i Karpiński 2018). Poziom RFT i aktywność systemu antyoksydacyjnego ulegają dobowym oscylacjom (Lai i in. 2012; Jiménez i in. 2021). Zwykle obserwuje się gromadzenie RFT w ciągu dnia i obniżanie ich poziomu w trakcie nocy (Lai i in. 2012; Jiménez i in. 2021). W wyniku zaburzenia fotoperiodu i ciągłego oświetlenia roślin stwierdzono zmiany w poziomie nadtlenu wodoru oraz różnych elementów systemu antyoksydacyjnego u rzodkiewnika (Abuelsoud i in. 2020). Autorzy sugerowali, że zwiększone gromadzenie RFT może być związane z regulacją odpowiedzi na wydłużony fotoperiod. Jednak warto podać, że w tym układzie doświadczalnym



obserwowano zmiany zaledwie po jednym wydłużonym fotoperiodzie. Nie wiemy jak wyglądałyby zależności u roślin poddanych permanentnemu zanieczyszczeniu światłem.

### **Zmiany w metabolizmie**

Przemiany związków organicznych i produkowanie specyficznych metabolitów jest regulowane u roślin przez szereg czynników zewnętrznych i wewnętrznych, w tym przez światło – jego ilość, jakość i długość trwania w cyklu dobowym (Kim i in. 2017). Dlatego można się spodziewać, że zaburzenia w odbiorze sygnału świetlnego będą wpływać na metabolizm roślin. Wykazano zmiany w metabolizmie hormonów (auksyn i cytokinin) pod wpływem zaburzonego fotoperiodu (wydłużonego) (Frank i in. 2022). W przytoczonej pracy autorzy obserwowali zmiany na poziomie ekspresji genów i zawartości badanych hormonów już po jednym niewłaściwym fotoperiodzie, co sugeruje, że również u roślin traktowanych zanieczyszczeniem światłem możemy się spodziewać zmian na poziomie metabolizmu hormonów. Produkcja cukrów w trakcie fotosyntezy jest początkiem każdej ścieżki metabolicznej, a jednocześnie zapewnia roślinie zapasy energetyczne. O ile produkcja cukrów zależy głównie od natężenia światła, to przekształcanie cukrów prostych w złożone, ich transport, magazynowanie i ponowne uruchamianie jest kontrolowane przez fotoperiod docierający do rośliny (Gendron i in. 2021). Dla przykładu, ciągłe oświetlenie roślin pomidora przez 12 dni spowodowało zaburzenia w metabolizmie cukrów prostych i złożonych (Haque i in. 2015). Podobnie, zaburzenia w metabolizmie cukrów pod wpływem ciągłego oświetlenia obserwowali w liściach pomidora Valez-Ramirez i współautorzy (2017) czy u ogórka Wolf i Langerud (2006). Można się spodziewać, że jeśli metabolizm pierwotny cukrowców jest zaburzony pod wpływem ciągłego oświetlenia to przełoży się także na metabolizm związków wtórnych, gdyż ścieżki metaboliczne u roślin ściśle od siebie zależą (Kołton i in. 2022b). Udział długości dnia (fotoperiodu) w regulacji gromadzenia związków wtórnych u roślin został podkreślony przez Yang i współautorów (2018). Ciekawe wyniki można też znaleźć w pracach dotyczących metabolizmu wtórnego roślin pod wpływem zmiennego fotoperiodu, prowadzonych w kulturach sterylnych. Dla przykładu, ciągłe oświetlenie kultur komórkowych winorośli ograniczało gromadzenie związków fenolowych, w tym cennych dla zdrowia człowieka stilbenów (Andi i in. 2019). Podobnie, obniżenie gromadzenia związków fenolowych w warunkach ciągłego oświetlenia uzyskano w kulturach *Fagonia indica* (Khan i in. 2018). Wyniki te zachęcają do dalszych badań.

### **Zmiany w odpowiedzi na warunki stresowe**

Rośliny są w większości organizmami osiadłymi, niezdolnymi do ucieczki przed stresem. Dlatego wykształciły mechanizmy umożliwiające unikanie stresu, koordynowane przez wewnętrzny zegar biologiczny. Zegar ten jest dostrajany do aktualnych warunków m.in. poprzez warunki świetlne i fotoperiod. Zaburzenie fotoperiodu skutkuje rozstrojeniem zegara roślin i warunków środowiska zewnętrznego i obniża zdolność roślin do radzenia sobie ze stresem biotycznym i abiotycznym (Xu i in. 2022). Skracający się fotoperiod zapewnia wchodzenie roślin w stan spoczynku, co zwiększa ich wytrzymałość na mróz. Zaburzenie (wydłużenie) fotoperiodu przez sztuczne światło w nocy może zmniejszyć zdolność roślin do nabywania odporności na mróz (Roeber i in. 2022). Długość okresu światła w cyklu dobowym wpływa także na zdolność do przetrwania stresu biotycznego czyli związanego z atakiem wirusów, bakterii i grzybów (Roeber i in. 2022). Autorzy podają, że wydłużenie fotoperiodu zwykle zwiększa odporność roślin na atak patogenów. Jednak w cytowanych badaniach rośliny są poddane okresom światła i ciemności w cyklu dobowym, jedynie fotoperiod jest wydłużony. Nie stosowano 24h oświetlenia symulującego zanieczyszczenie światłem. Dodatkowo opisywana reakcja może być związana z większą dostępnością cukrów po wydłużonym fotoperiodzie. Dlatego należałoby sprawdzić czy ciągłe oświetlenie (zanieczyszczenie światłem) zwiększy czy obniży zdolność roślin do radzenia sobie ze stresem biotycznym. Wpływ fotoperiodu na mechanizmy obronne roślin jest podkreślony w pracy Hua (2013). Podano, że ciągłe oświetlenie modyfikuje odpowiedź roślin na patogeny. Wciąż brakuje szczegółowych prac wyjaśniających, jak zanieczyszczenie światłem w nocy wpłynie na interakcje roślina – patogen, czy roślina – szkodnik.

### **Zmiany w funkcjonowaniu aparatu fotosyntetycznego**

W wielu pracach podkreślany jest negatywny wpływ ciągłego oświetlenia na blaszki liściowe roślin uprawnych. Obserwuje się przebarwienia (chlorozy) i zamieranie (nekrozy) liści pod wpływem 24h oświetlenia (Kołton i in. 2022; Shibaeva i in. 2023). Ważny jest jednak nie efekt wizualny ale fakt, że liść to główny organ prowadzący fotosyntezę. Jego uszkodzenie będzie powodować zaburzenia w tym procesie (Shibaeva i in. 2023). Ciągłe oświetlenie liści prowadzi do zmian w zawartości chlorofilu (Haque i in. 2015; Kumar i in. 2022), zdolności do wiązania dwutlenku węgla (Haque i in. 2015) czy wydajności fotochemicznej fotosystemu II (Valez-Ramirez i in. 2017). Ciągłe światło może także przyspieszyć proces starzenia liści co także ogranicza wydajność fotosyntetyczną (Valez-Ramirez i in. 2011). Ciągłe oświetlenie roślin pomidora przez 12 dni obniżyło intensywność fotosyntezy oraz maksymalną wydajność

fotocemiczną fotosyntemu II, co wiązało się z obniżeniem zawartości chlorofili w liściach i przebarwieniami liści (Haque i in. 2015). Te wszystkie zmiany będą prowadzić do mniejszej produkcji biomasy, a w przypadku roślin uprawnych do mniejszego plonowania. Jednak w przypadku roślin występujących w lasach, parkach czy na łąkach mniejsza wydajność fotosyntetyczna pod wpływem zanieczyszczenia światłem może przekładać się także na krótsze życie roślin, mniejszą dekoracyjność, czy mniejszy udział w globalnej gospodarce dwutlenkiem węgla.

## Podsumowanie

Na koniec pragniemy jeszcze raz podkreślić, że ciągle brakuje pełnej wiedzy i szczegółowych informacji o wpływie zanieczyszczenia światłem na rośliny. Jak będzie regulować ich biologię w miastach, gdzie poziom zanieczyszczenia światłem jest większy, a jak w terenach poza miejskich gdzie skażenie światłem jest mniejsze? Nie znamy bezpiecznego poziomu światła w nocy dla roślin, ani nie potrafimy pogrupować roślin na bardziej odporne i wrażliwe na ten problem środowiskowy. Dlatego zachęcamy do podejmowania tego tematu badawczego, budowania wiedzy i sieci informacji, bo zanieczyszczenie światłem ciągle rośnie. Tylko kompletna wiedza będzie mocnym argumentem w dyskusji zachęcającej do ograniczenia nadmiernego stosowania oświetlenia. Jesteśmy przekonani, że takie działania są konieczne do zapewnienia stabilnego trwania ekosystemów.

## Literatura

- Abuelsoud W., Cortleven A., Schmülling T., 2020. Photoperiod stress induces an oxidative burst-like response and is associated with increased apoplastic peroxidase and decreased catalase activities. *Journal of Plant Physiology* 253: 153252.
- Andi S., A., Gholami M., Ford C.M., Maskani F., 2019. The effect of light, phenylalanine and methyl jasmonate, alone or in combination, on growth and secondary metabolism in cell suspension cultures of *Vitis vinifera*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 199: 111625.
- Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Bell F., Gaston K.J., 2016. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology* 104: 611–620. DOI:10.1111/1365-2745.12551.
- Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Bell F., Gaston K.J., 2018. Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *Journal of Applied Ecology* 55: 442–450. DOI:10.1111/1365-2664.12927.
- Bigler C., Bugmann H., 2018. Climate-induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Science Report* 7(1): 1–10. DOI:10.1038/s41598-018-27893-1.

- Brelsford C.C., Nybakken L., Kotilainen T.K., Robson T.M., 2019. The influence of spectral composition on spring and autumn phenology in trees. *Tree physiology* 39(6): 925–950.
- Caird M.A., Richards J.H., Donovan L.A., 2007. Nighttime stomatal conductance and transpiration in C3 and C4 plants. *Plant Physiology* 143: 4-10.
- Chen C., Xiao Y.G., Li X., Ni M., 2012. Light-regulated stomatal aperture in Arabidopsis. *Molecular Plant* 5(3): 566–572.
- Czaja M., Kołton A., Muras P., 2020. The complex issue of urban trees—stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests* 11: 932. DOI:10.3390/f11090932.
- Czaja M., Kołton A., 2022. How light pollution can affect spring development of urban trees and shrubs. *Urban Forestry & Urban Greening* 77: 127753. DOI:10.1016/j.ufug.2022.127753.
- Czarnocka W., Karpiński S., 2018. Friend or foe? Reactive oxygen species production, scavenging and signaling in plant response to environmental stresses. *Free Radical Biology and Medicine* 122: 4–20.
- Dörken V.M., Lepetit B., 2018. Morpho-anatomical and physiological differences between sun and shade leaves in *Abies alba* Mill. (Pinaceae, Coniferales): a combined approach. *Plant. Cell & Environment* 41(7): 1683–1697.
- Dowling C.A., Melzer R., Schilling S., 2021. Timing is everything: The genetics of flowering time in *Cannabis sativa*. *The Biochemist* 43(3): 34-38.
- Equiza M.A., Day M.E., Jagels R., 2006. 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* 26(3): 353–364.
- Ffrench-Constant R.H., Somers-Yeates R., Bennie J., Economou T., Hodgson D., Spalding A., McGregor P.K., 2016. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 283(1833): 20160813. DOI:10.1098/rspb.2016.0813.
- Forrest J.R., 2015. Plant–pollinator interactions and phenological change: what can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos* 124(1): 4–13.
- Frank M., Cortleven A., Pěnčík A., Novak O., Schmölling T., 2022. The photoperiod stress response in *Arabidopsis thaliana* depends on auxin acting as an antagonist to the protectant cytokinin. *International Journal of Molecular Sciences* 23(6): 2936.
- Franklin K.A., Larner V.S., Whitelam G.C., 2005. The signal transducing photoreceptors of plants. *International Journal of Developmental Biology* 49(5–6): 653–664. DOI:10.1387/ijdb.051989kf.
- Fricke W., 2019. Night-Time Transpiration – Favouring Growth? *Trends in Plant Science* 24(4): 311–317.
- Galvão V.C., Fankhauser C., 2015. Sensing the light environment in plants: photoreceptors and early signaling steps. *Current Opinion in Neurobiology* 34: 46–53.

- Gaudinier A., Blackman B.K., 2020. Evolutionary processes from the perspective of flowering time diversity. *New Phytologist* 225(5): 1883–1898.
- Gendron J.M., Leung C.C., Liu W., 2021. Energy as a seasonal signal for growth and reproduction. *Current Opinion in Plant Biology* 63: 102092.
- Hänninen H., Kramer K., Tanino K., Zhang R., Wu J., Fu Y.H., 2019. Experiments are necessary in process-based tree phenology modelling. *Trends Plant Science* 24(3): 199–209. DOI:10.1016/j.tplants.2018.11.006.
- Haque M.S., Kjaer K.H., Rosenqvist E., Ottosen C.O., 2015. Continuous light increases growth, daily carbon gain, antioxidants, and alters carbohydrate metabolism in a cultivated and a wild tomato species. *Frontiers in Plant Science* 6: 522.
- Hua J., 2013. Modulation of plant immunity by light, circadian rhythm, and temperature. *Current Opinion In Plant Biology* 16(4): 406–413.
- Jiménez A., Sevilla F., Martí M.C., 2021. Reactive oxygen species homeostasis and circadian rhythms in plants. *Journal of Experimental Botany* 72(16): 5825–5840.
- Jin S., Nasim Z., Susila H., Ahn J.H., 2021. Evolution and functional diversification of flowering locus T/terminal flower 1 family genes in plants. *Seminars in Cell & Developmental Biology* 109: 20–30.
- Khan T., Abbasi B.H., Khan M.A., 2018. The interplay between light, plant growth regulators and elicitors on growth and secondary metabolism in cell cultures of *Fagonia indica*. *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology* 185: 153–160.
- Kim J.A., Kim H.S., Choi S.H., Jang J.Y., Jeong M.J., Lee, S.I., 2017. The importance of the circadian clock in regulating plant metabolism. *International Journal of Molecular Sciences* 18(12): 2680.
- Kołton A., Czaja M., Długosz-Grochowska O., 2021. Artificial lighting and light pollution from the plant's point of view. [w:] Ścieżor T. (red.), *Ecological and astronomical aspects of light pollution*. Cracow University of Technology, Kraków: 39–54.
- Kołton A., Długosz-Grochowska O., Wojciechowska R., Czaja M., 2022b. Biosynthesis regulation of folates and phenols in plants. *Scientia Horticulturae* 291: 110561.
- Kołton A., Wojciechowska R., Czaja M., 2022. Modyfikacja budowy morfologicznej liści klonu jawora i dławisza okrągłolistnego na skutek zanieczyszczenia światłem nocą. [w:] Tabaka P. (red.), *Sztuczne światło nocą między zagrożeniem a rozwojem*. Monografie Politechniki Łódzkiej 236, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź.
- Kumar D., Singh H., Bhatt U., Soni V., Allakhverdiev S., 2021. Effect of continuous light on antioxidant activity, lipid peroxidation, proline and chlorophyll content in *Vigna radiata* L. *Functional Plant Biology* 49(2): 145–154.
- Kwak M.J., Lee S.H., Khaine I., Je S.M., Lee T.Y., You H.N., Lee H.K., Jang J.H., Woo S.Y., 2017. Stomatal movements depend on interactions between external night light cue and internal signals activated by rhythmic starch turnover and abscisic acid (ABA) levels at dawn and dusk. *Acta Physiologiae Plantarum* 39: 1–12.
- Kyba C.C., Altıntaş Y.Ö., Walker C.E., Newhouse, M., 2023. Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science* 379(6629): 265–268.

- Lagercrantz U., 2009. At the end of the day: a common molecular mechanism for photoperiod responses in plants? *Journal of Experimental Botany* 60(9): 2501–2515.
- Lai A.G., Doherty C.J., Mueller-Roeber B., Kay S.A., Schippers J.H., Dijkwel, P.P., 2012. Circadian clock-associated 1 regulates ROS homeostasis and oxidative stress responses. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(42): 17129–17134.
- Lichtenthaler H.K., Ač A., Marek M.V., Kalina J., Urban O., 2007. Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species. *Plant Physiology and Biochemistry* 45(8): 577–588.
- Lichtenthaler H.K., Buschmann C., Döll M., Fietz H.J., Bach T., Kozel U., Meier D., Rahmsdorf U., 1981. Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynthesis Research* 2(2): 115–141.
- Melotto M., Zhang L., Oblessuc P.R., He S.Y., 2017. Stomatal defense a decade later. *Plant Physiology* 174(2): 561–571.
- Mittler R., 2017. ROS are good. *Trends in Plant Science* 22(1): 11–19.
- Paik I., Huq E., 2019. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in Cell and Developmental Biology* 92: 114–121.
- Panchen Z.A., Primack R.B., Gallinat A.S., Nordt B., Stevens A.D., Du Y., Fahey R., 2015. Substantial variation in leaf senescence times among 1360 temperate woody plant species: implications for phenology and ecosystem processes. *Annals of Botany* 116(6): 865–873.
- Park Y.G., Jeong, B.R., 2020. How supplementary or night-interrupting low-intensity blue light affects the flower induction in chrysanthemum, a qualitative short-day plant. *Plants* 9(12): 1694.
- Pham M.D., Hwang H., Park S.W., Cui M., Lee H., Chun C., 2019. Leaf chlorosis, epinasty, carbohydrate contents and growth of tomato show different responses to the red/blue wavelength ratio under continuous light. *Plant Physiology and Biochemistry* 141: 477–486.
- Roeber V.M., Bajaj I., Rohde M., Schmülling T., Cortleven A., 2021. Light acts as a stressor and influences abiotic and biotic stress responses in plants. *Plant, Cell & Environment* 44(3): 645–664.
- Roeber V.M., Schmülling T., Cortleven A., 2022. The photoperiod: handling and causing stress in plants. *Frontiers in Plant Science* 12: 781988.
- Roxas A.A., Orozco J., Guzmán-Delgado P., Zwieniecki M.A., 2021. Spring phenology is affected by fall non-structural carbohydrate concentration and winter sugar redistribution in three Mediterranean nut tree species. *Tree Physiology* 41(8): 1425–1438. DOI:10.1093/treephys/tpab014.
- Shibaeva T.G., Mamaev A.V., Titov A.F., 2023. Possible physiological mechanisms of leaf photodamage in plants grown under continuous lighting. *Russian Journal of Plant Physiology* 70(2): 1–11.

- Shimazaki K.I., Doi M., Assmann S.M., Kinoshita T., 2007. Light regulation of stomatal movement. *Annual Review of Plant Biology* 58: 219–247.
- Škvareninová J., Tuhárska M., Škvarenina J., 2017. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian Geographical Reports* 25(4): 282–290.
- Tabaka P., 2021. 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* 14(19): 6383.
- Thomas B., 2006. Light signals and flowering. *Journal of Experimental Botany* 57(13): 3387–3393.
- Velez-Ramirez A.I., Carreño-Quintero N., Vreugdenhil D., Millenaar F.F., van Ieperen W., 2017. Sucrose and starch content negatively correlates with PSII maximum quantum efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum*) exposed to abnormal light/dark cycles and continuous light. *Plant and Cell Physiology* 58(8): 1339–1349.
- Velez-Ramirez A.I., van Ieperen W., Vreugdenhil D., Millenaar F.F., 2011. Plants under continuous light. *Trends in plant science* 16(6): 310-318.
- Vilhar U., Beuker E., Mizunuma T., Skudnik M., Lebourgeois F., Soudani K., Wilkinson M., 2013. Tree phenology. *Developments in Environmental Science* 12: 169–182. DOI:10.1016/B978-0-08-098222-9.00009-1.
- Warrington I.J., Norton R.A., 1991. An evaluation of plant growth and development under various daily quantum integrals, *Journal of the American Society for Horticultural Science* 116(3): 544–551.
- Way D.A., Montgomery R.A., 2015, Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world. *Plant, Cell & Environment* 38(9): 1725–1736.
- Wolff S.A., Langerud A., 2006. Fruit yield, starch content and leaf chlorosis in cucumber exposed to continuous lighting. *European Journal of Horticultural Science* 71(6): 259.
- Xu X., Yuan L., Yang X., Zhang X., Wang L., Xie Q., 2022. Circadian clock in plants: Linking timing to fitness. *Journal of Integrative Plant Biology* 64(4): 792–811.
- Yang L., Wen K.S., Ruan X., Zhao Y.X., Wei F., Wang Q., 2018. Response of plant secondary metabolites to environmental factors. *Molecules* 23(4): 762.
- Yeang H. Y., 2013. Solar rhythm in the regulation of photoperiodic flowering of long-day and short-day plants. *Journal of Experimental Botany* 64(10): 2643–2652.

## Streszczenie

Ze względu na kluczową rolę światła w procesach wzrostu i rozwoju roślin traktujemy je jako pozytywny czynnik regulujący ich funkcjonowanie. Wraz z rozwojem wiedzy dotyczącej wpływu światła na rośliny (zarówno w warunkach kontrolowanych upraw jak i w naturze), coraz więcej wiemy również o jego niekorzystnych aspektach. Zarówno niedobór jak i nadmiar światła mogą negatywnie wpływać na rośliny. Do niekorzystnych aspektów światła należy także dodać niewłaściwy skład spektralny promieniowania oraz niewłaściwy czas trwania okresów światła i ciemności w cyklu dobowym (ang. *photoperiod*). Ten aspekt opisywany jest w literaturze jako syndrom zaburzenia fotoperiodu (ang. *photoperiod stress syndrom*) lub oddziaływanie zanieczyszczenia światłem (ang. *light pollution*). Od wielu lat wykazywano zaburzenia we wzroście i rozwoju roślin pod wpływem zaburzonego fotoperiodu, ale zazwyczaj w warunkach laboratoryjnych w kontekście upraw pod osłonami. Jednak jako konsekwencja intensywnego oświetlenia miejsc związanych z działalnością człowieka obserwujemy takie zaburzenia poza miejscem prowadzenia prac badawczych – w różnych ekosystemach. W prezentowanej pracy przedstawiamy opisane konsekwencje zanieczyszczenia światłem dla roślin oraz efekty obserwowane w trakcie badań laboratoryjnych dotyczących zaburzenia fotoperiodu.

**Słowa kluczowe:** fotoperiod, ciągłe oświetlenie, fazy fenologiczne, metabolizm, aparat fotosyntetyczny.



## **The impact of light pollution on plants - what we know and what to expect**

### **Summary**

Due to the key role of light in the processes of plant growth and development, we consider it as a positive factor regulating their functioning. With the development of knowledge about the impact of light on plants (both in controlled cultivation and in nature), we also know more and more about its adverse aspects. Both shortage and excess light can negatively affect plants. The unfavorable aspects of light also include the wrong spectral composition of the radiation and the wrong duration of light and dark periods in the 24-hour cycle (photoperiod). This aspect is described in the literature as photoperiod stress syndrome or light pollution. For many years, disturbances in the growth and development of plants under the influence of disturbed photoperiod have been demonstrated, but usually in laboratory conditions in the context of crops grown under cover. However, as a consequence of the intense lighting of places associated with human activity and the increasing light pollution on Earth, we observe such disturbances outside the place of research work – in various ecosystems. In the presented work, we present the described consequences of light pollution for plants and the effects observed during laboratory studies on photoperiod disturbance.

**Key words:** photoperiod, continuous lighting, phenological phases, metabolism, photosynthetic apparatus.

### **Dane kontaktowe autorek:**

**Anna Kołton**

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa  
e-mail: [anna.kolton@urk.edu.pl](mailto:anna.kolton@urk.edu.pl)

**Monika Czaja**

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa  
e-mail: [monika.czaja@urk.edu.pl](mailto:monika.czaja@urk.edu.pl)

Karolina Skorb

## Zanieczyszczenie światłem jako czynnik odpowiedzialny za globalną apokalipsę owadów – podsumowanie badań

### Wprowadzenie

W ciągu minionych dwudziestu lat, niezależnie w wielu miejscach na całej Ziemi, odnotowano gwałtowne spadki liczebności owadów i redukcję ich różnorodności gatunkowej (Dirzo i in. 2014; Potts i in. 2010). Globalna „apokalipsa owadów” (Jarvis 2018) wywołała dyskusję dotyczącą ich roli na świecie. Te stawonogi są kluczowym elementem łańcuchów troficznych, zarówno lądowych jak i słodkowodnych (Baxter i in. 2005; van Veen i in. 2006) oraz zapewniają ważne usługi ekosystemowe (Schowalter i in. 2018). Gwałtowny spadek ich populacji zachwieje równowagę biologiczną na całej planecie. Badania wskazują, że spadek liczebności owadów spowodowany jest łącznym oddziaływaniem kilku zmian antropogenicznych: utratą i fragmentacją siedlisk, zanieczyszczeniami chemicznymi (szczególnie stosowaniem pestycydów), rozprzestrzenianiem się gatunków inwazyjnych oraz zmianami klimatu (Sánchez-Bayo i Wyckhuys 2019). Rzadko natomiast wspomina się o innych zaburzeniach, spowodowanych działalnością człowieka, które w znaczący sposób wpływają na zachowanie i funkcjonowanie owadów, zarówno w cyklu rocznym jak i dobowym. Prawdopodobnie preferencje ekologów do badania zjawisk zachodzących w ciągu dnia (Gaston 2019) odpowiadają za przeoczenie tak powszechnego zaburzenia, jakim jest nocne zanieczyszczenie światłem.

Zanieczyszczenie sztucznym światłem (ALAN, ang. *Artificial Light At Night*) na skutek rosnącej urbanizacji i postępującej elektryfikacji, w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat intensywnie wzrasta na całym świecie (Kyba 2018). Badania jasności nocnego nieba w 2014 roku wykazały, że 23% powierzchni lądowych

(między równoleżnikami 75°N a 60°S), w tym 88% Europy i 47% Stanów Zjednoczonych, doświadcza zanieczyszczenia światłem w postaci wzrostu jasności nocnego nieba o co najmniej 8% powyżej naturalnego poziomu. Ponadto naukowcy wskazują, że aż 83% ludności żyje na obszarach skażonych sztucznym światłem (Falchi i in. 2016). Najnowsze badania wykazały, że nocne niebo nad Ameryką Północną i Europą co roku staje się jaśniejsze o 9,6%, co globalnie redukuje widoczność gwiazd (Kyba 2023). Dodatkowo narażone na zanieczyszczenie światłem stają się zarówno obszary najbardziej bogate pod kątem bioróżnorodności (ang. *biodiversity hotspots*) (Guetté i in. 2018), jak i tereny rolnicze (FAO 2012).

Coraz więcej badań wskazuje, że ALAN może wpływać na kondycję roślin i zwierząt (Bennie i in. 2016; Gaston i in. 2013), w tym na owady (Desouhant i in. 2019; Grubisic i in. 2018; Owens i Lewis 2018; Seymoure 2018). Źródła światła, emitowanego po zmroku były używane do zabijania owadów już od około 60 roku n.e. (Beavis 1995). Do dzisiaj do łapania owadów wykorzystywane są pułapki świetlne, pomagające określić różnorodność gatunkową w danym siedlisku. Ze względu na wrażliwość owadów na światło, ALAN stanowi dla nich potężną pułapkę ewolucyjną (Schlaepfer i in. 2002; Altermatt i Ebert 2016; Hopkins i in. 2018). Zanieczyszczenie światłem stanowi taki rodzaj zaburzenia, którego organizmy żywe nie doświadczały w ciągu ewolucji życia na ziemi. Większość zaburzeń antropogenicznych ma swoje naturalne odpowiedniki: w dziejach Ziemi klimat często ulegał zmianom, siedliska uległy fragmentacji, gatunki kolonizowały kolejne obszary, a rośliny wytwarzały substancje szkodliwe dla owadów. Jednak przez cały okres ewolucji owadów na ziemi, dobowe i roczne cykle światła i ciemności oraz fazy księżyca pozostawały stałe. Do XX wieku, do czasu rozwoju techniki świetlnej, owady nie miały możliwości, by przystosować się do zmieniającego się nocnego krajobrazu (Altermatt i Ebert 2016).

Zanieczyszczenie światłem, w zależności od gatunku, będzie miało różne oddziaływanie na zachowanie owadów. Niektóre gatunki wycofują się ze środowisk skażonych światłem, podczas gdy inne podążają ku nim (Farnworth i in. 2018). Te, które chaotycznie gromadzą się wokół źródeł światła, często padają ofiarami drapieżników, bądź giną na skutek wyczerpania (Frank 1988; Owens i Lewis 2018). Badania sugerują, że nawet jedna trzecia owadów przyciąganych przez sztuczne światło, umiera przed świtem (Eisenbeis 2006; Frank 2006; Yoon i in. 2010); zaś przyciągane przez reflektory pojazdów giną natychmiast (Frank 2006; Gaston i Holt 2018). Owady, którym uda się uniknąć bezpośredniego narażenia na sztuczne światło, również mogą doświadczać jego negatywnych skutków. ALAN oddziałuje daleko poza centra miast, skutecznie

tłumiąc ważne wskazówki środowiskowe, takie jak światło i fazy księżyca, światło gwiazd oraz długość dnia (Davies i in. 2013b; Kyba i in. 2011a, 2011b). Są one szczególnie ważne dla owadów prowadzących nocny tryb życia, z tego względu zanieczyszczenie światłem będzie miało najsilniejszy wpływ właśnie na tę grupę zwierząt (Kokko i Sutherland 2001). Wieloletnie holenderskie badania dużych motyli wskazują istotny spadek populacji gatunków nocnych, w porównaniu do liczebności motyli dziennych, mniej wrażliwych na sztuczne światło (van Langevelde i in. 2018). Wiele badań dowodzi, że ALAN przyczynia się do światowego spadku entomofauny, szczególnie gatunków zasiedlających tereny otwarte, bardziej narażone na sztuczne światło w nocy (Coulthard i in. 2019; Fox i in. 2014; Sánchez-Bayo i Wyckhuys 2019; van Strien i in. 2019).

Zanieczyszczenie światłem wpływa na wiele różnych funkcji biologicznych owadów, może również nasilać swoje oddziaływanie poprzez interakcje z innymi zaburzeniami antropogenicznymi. Oddziaływania na pojedyncze gatunki mają wpływ na kolejne ogniwa łańcuchów pokarmowych, a dokładne konsekwencje są bardzo trudne do przewidzenia (Sanders i Gaston 2018). W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione hipotezy tłumaczące dlaczego owady podążają do światła oraz jak zanieczyszczenie światłem wpływa na główne aspekty ich życia.

### **Dlaczego owady podążają do światła**

Zachowanie latających owadów wobec źródeł światła emitowanego po zmroku było tak powszechnym zjawiskiem, że zainspirowało wielu pisarzy do opisanego w literaturze pięknej. Jednym z przykładów jest cytat z „Lalki” Bolesława Prusa *„Człowiek jest jak ćma: na oślepie rwie się do ognia, choć go boli i choć się w nim spali. Robi to jednak dopóty (...) dopóki nie oprzytomnieje. I tym różni się od ćmy.”* Już w Cesarstwie Rzymskim około I roku naszej ery do łapania owadów wykorzystywano wiedzę o ich podążaniu do źródeł światła (Gardiner 1995). Mimo że charakterystyczne zachowanie owadów względem światła było obserwowane przez tysiące lat, do dzisiaj przyczyna tego zjawiska nie została do końca wyjaśniona. Naukowcy wysnuli cztery główne hipotezy tłumaczące to zachowanie. Pierwsza z nich dowodzi, że podążanie do światła stanowi swoisty mechanizm ucieczki przed drapieżnikami, w którym jasne miejsca stanowią odzwierciedlenie luk między liśćmi drzew i krzewów (Mazokhin-Porshnyakov 1960). Kolejna hipoteza sugerowała, że owady latające nawigują względem światła księżyca, stąd ich intensywne podążanie do pozostałych źródeł światła emitowanego w nocy (Sothibandhu i Baker 1979). Inna hipoteza tłumaczyła, że to promieniowanie cieplne źródeł światła przyciąga owady (Callahan 1965). Ostatnia zaś wyjaśnia, że owady przystosowane do nocnego trybu życia są wyjątkowo wrażliwe na światło, przez co oślepienie sztucznym światłem, zostają

„uwięzione” wokół jego źródła, co przejawia się w ich nieregularnym locie (Hsiao 1973). Z czterech przedstawionych wyżej hipotez aktualnie tylko jedna – o przyciąganiu przez promieniowanie cieplne – została obalona. Pozostałe trzy, mimo że zaproponowane kilkadziesiąt lat temu, do dzisiaj obowiązują, jednak nie zostały ostatecznie potwierdzone. Nauka XXI wieku niesie jednak nowe rozwiązania techniczne, które mogą pomóc nam zrozumieć schemat funkcjonowania owadów w nocnym krajobrazie. Najnowsze, częściowo tylko opublikowane wyniki badań, z wykorzystaniem technologii śledzenia trajektorii lotu oraz orientacji przestrzennej owadów wykazały, że owady nie kierują się bezpośrednio w stronę światła. Zamiast tego odwracają się grzbietem w kierunku jego źródła (Fabian i in. 2023). W naturalnym oświetleniu słońca czy księżycy ustawienie grzbietu w stronę źródła światła pomaga utrzymać właściwą pozycję i orientację przestrzenną. Przez miliony lat ewolucji był to niezawodny sposób do określenia swojej pozycji przestrzennej względem siły grawitacji, szczególnie dla małych owadów, które poruszają się w powietrzu z niższym stosunkiem sił bezwładności do sił lepkości (Berry i in. 2011). Mniejsze owady, takie jak np. muchówki, nie mogą korzystać ze stabilnego lotu biernego, za to wciąż muszą aktywnie i szybko korygować swoją pozycję. W długiej ewolucyjnej historii lotu owadów, najjaśniejszą częścią pola widzenia było niebo. Był to więc solidny wskaźnik, gdzie znajduje się góra, a gdzie dół. Strategia ta nie sprawdza się jednak w obliczu źródeł sztucznego światła. Owad, ustawiając się grzbietem względem lampy, wpada w swoistą pułapkę świetlną. Pozornie wykonując nieregularne loty, w rzeczywistości prostopadle naciera na źródło światła (Fabian i in. 2023). Traci przez to cenny czas na żerowanie i rozmnażanie się, jednocześnie narażając się na ataki drapieżników.

Pełne zrozumienie interakcji między owadami a sztucznym światłem jest kluczowe, szczególnie w kontekście globalnego wzrostu zanieczyszczenia sztucznym światłem, które w coraz większym stopniu przyczynia się do spadku liczebności owadów na świecie (Owens i Lewis 2018).

### **Wpływ sztucznego światła na orientację czasową owadów**

Owady, tak jak większość gatunków lądowych, cechują się okołodobowymi i okołorocznymi wzorcami aktywności, regulującymi pory żerowania, rozmnażania i migracji, które są zsynchronizowane odpowiednio z dobowymi, miesięcznymi i rocznymi cyklami naturalnego światła (Owens i Lewis 2018). Są wrażliwe na zmiany światła dzięki wyspecjalizowanym fotoperiodycznie receptorom, wykorzystującym zewnętrzne sygnały świetlne do zainicjowania odpowiednich zmian fizjologicznych. U owadów o nocnym trybie życia, pora rozpoczęcia żerowania oraz poszukiwania partnera, dyktowana jest przez

wewnętrzny zegar biologiczny, pobudzany przez światło bądź temperaturę (Saunders 2009; Tataroglu i Emery 2014). Natomiast miesięczne i roczne cykle kopulacji, składania jaj i wylęgu mogą być stymulowane przez światło księżyca bądź bezpośrednio przez długość dnia (Kronfeld-Schor i in. 2013). Dlatego jeśli zanieczyszczenie światłem jest wystarczająco intensywne i/lub utrzymuje się przez dłuższy czas oraz ma określony skład widmowy, może spowodować desynchronizację wewnętrznego zegara (Saunders 2012), co może mieć katastrofalne konsekwencje dla przyszłości populacji owadów na świecie.

### **Wpływ sztucznego światła na orientację przestrzenną owadów**

Zanieczyszczenie światłem może także powodować dezorientację przestrzenną, szczególnie u owadów latających, zaburzając zdolność organizmu do prawidłowego poruszania się w trójwymiarowej przestrzeni. Bez odpowiednich wskazówek trudno jest nawigować w nocnym krajobrazie, dlatego owady, podobnie jak inne zwierzęta, wykorzystują stałe elementy środowiska do orientacji przestrzennej. Po zmroku najważniejszymi punktami orientacyjnymi dla owadów są księżyc i gwiazdy, na drugim miejscu zaś ich spolaryzowane światło (Dacke i in. 2011). Te jasne punkty na niebie zmieniają się w przewidywalny sposób zarówno podczas nocy, jak i w ciągu roku, dlatego przez miliony lat ewolucji stanowiły niezawodny wskaźnik usytuowania w przestrzeni. Do dzisiaj wiele nocnych owadów, takich jak ćmy (Baker 1987) czy termity z rodziny *Hodotermitidae* (Leuthold i in. 1976) wykorzystują księżyc lub gwiazdy do prawidłowego przemieszczania się. Niektóre morskie stawonogi orientują się względem położenia księżyca, podążając wzdłuż morskich wybrzeży, co zostało udowodnione również w warunkach laboratoryjnych (Ugolini i in. 2005). Inne zwierzęta zaś mogą nawigować jedynie dzięki gwiazdom (Foster i in. 2018). W bezksiężycowe noce ćmy rolnice tasiemki *Noctua pronuba* określają swoje położenie względem Gwiazdy Polarnej (Sotthibandhu i Baker 1979), a chrząszcze z rodziny poświętnikowatych *Scarabaeus satyrus* wykorzystują Drogę Mleczną do podążania w linii prostej. Natomiast kiedy księżyc oświetla nocny krajobraz, chrząszcze te nawigują względem spolaryzowanego światła gwiazd i księżyca (Dacke i in. 2013). Podobnie zachowują się inne owady aktywne nocą, takie jak niektóre gatunki os (Warrant i in. 2006), pszczoł (Greiner i in. 2007; Warrant i Dacke 2011), świerszczy (Herzmann i Labhart 1989) czy mrówek (Reid i in. 2011; Narendra 2013).

ALAN może zakłócać wszystkie powyższe formy nocnej nawigacji na dwa sposoby. Same źródła sztucznego światła w nocy stanowią czynnik, który zwierzęta mogą pomylić z księżycem lub gwiazdami. Dodatkowym zjawiskiem wynikającym z wprowadzania sztucznego oświetlenia w nocny krajobraz jest

łuna świetlna, powstająca na skutek kierowania sztucznego światła powyżej płaszczyzny horyzontu (*Zanieczyszczenie światłem...* 2022). Światło rozpraszając się w atmosferze zmniejsza widoczność istotnych punktów orientacyjnych. Łuna świetlna (ang. *sky glow*) radykalnie ogranicza widoczność gwiazd w obszarach miejskich (Falchi i in. 2016), a sztuczne oświetlenie również zakłóca odbiór sygnałów w postaci światła spolaryzowanego (Kyba i in. 2011b).

### **Wpływ sztucznego światła na przemieszczanie się owadów**

Zarówno migracje sezonowe, jak i przemieszczanie się na krótsze dystanse w poszukiwaniu pożywienia, odgrywają kluczową rolę w zachowaniu zdolności przystosowawczych (ang. *fitness*) owadów (Rankin 1985; Hammock i Wetzel 2013) i są niezbędne do utrzymania i odbudowy populacji zagrożonych gatunków (Schultz i in. 2019). Przyciągające i odstrasające działanie sztucznego światła silnie zaburza naturalne wzorce ruchu (Allema i in. 2012) i ogranicza rozprzestrzenienie się owadów w środowisku (Degen i in. 2016; Macgregor i in. 2017; White 2018). Jednym z najczęściej spotykanych źródeł zanieczyszczenia sztucznym światłem są oprawy uliczne. Ciągi blisko rozmieszczonych latarni wzdłuż większości dróg działają jak bariera ekologiczna, zarówno dla owadów przyciąganych przez światło, jak i dla tych gatunków, które światła unikają (Eisenbeis 2006; Degen i in. 2016). Tempo przemieszczania się larw wodnych owadów o fototaksji ujemnej (unikające światła) jest znacznie niższe w obecności oświetlenia nad brzegami rzek (Henn i in. 2014; Perkin i in. 2014a). Sztuczne światło oddziałuje również na dorosłe osobniki, hamując ich przemieszczanie się między obszarami rozrodu, jednocześnie uniemożliwiając kolonizowanie nowych terytoriów (Perkin i in. 2014b).

Nocne sygnały świetlne odgrywają ważną rolę w orientacji przestrzennej wielu gatunków owadów (Foster i in. 2018; Owens i Lewis 2018). Przytaczane już badania na chrząszczach z rodziny poświętnikowatych *Scarabaeus satyrus* dowodzą, że widoczność gwiazd jest niezbędna do tego, aby owady te mogły skutecznie oddalać się od stosów odchodów, w których złożyły jaja (Dacke i in. 2013). Nocne światło jest także niezbędne do prawidłowego przemieszczania się niektórych aktywnych nocą bezkręgowców, takich jak zmieraczek plażowy *Talitrus saltator*. Skorupiaki te żerują na wodorostach wzdłuż linii brzegowej, utrzymując równoległą trasę dzięki nawigacji względem światła księżyca (Ugolini i in. 2005). Percepcja tych naturalnych źródeł światła może być częściowo lub całkowicie zaburzona w siedliskach zanieczyszczonych światłem (Kyba i in. 2011a, 2011b; Davies i in. 2013b), szczególnie gdy w pobliżu znajdują się latarnie uliczne, których światło zwierzęta mogą pomylić ze światłem księżyca. Rzędy emitujących światło latarni czy oświetlenie gruntowe wzdłuż

dróg, mogą także dezorientować latające owady, takie jak osy i ważki. Utrzymują one poziomą pozycję w powietrzu, w ten sposób, by jasna połowa pola widzenia była zawsze na górze (Goodman 1965; Berry i in. 2011). Niestety zarówno sztuczne oświetlenie, zlokalizowane ponad powierzchnią gruntu (upwelling), jak i światło emitowane od dołu (downwelling), silnie zaburzają prawidłowe przemieszczanie się owadów. Są jednak stosowane w rolnictwie, w celu redukcji szkodników (Shimoda i Honda 2013; Loughlin 2014; Shi i in. 2017).

### **Wpływ sztucznego światła na rozmnażanie owadów**

Zanieczyszczenie światłem może opóźnić lub wyeliminować okres, podczas którego nocne owady przystępują do zalotów i odbywają kopulacje (Dreisig 1975; Lall 1993; Li i in. 2019). Amerykańskie motyle nocne z rodziny sówkwatych *Helicoverpa zea* nie łączą się w pary, gdy zanieczyszczenie światłem jest silniejsze niż światło odbite przez kwadrę księżyca (Agee 1969). Inne nocne owady są prawdopodobnie równie wrażliwe, jednak nie zostały jeszcze pod tym kątem zbadane. Owady, którym udaje się utrzymać nocny tryb życia mimo zanieczyszczenia światłem, mogą nadal mieć trudności ze znalezieniem partnera do rozrodu (Owens i in. 2019). Przykładem jest większość gatunków świetlików. Ich zaloty wymagają wymiany sygnałów świetlnych, które są wytwarzane w procesie bioluminescencji. Światło emitowane przez świetliki jest niestety tłumione przez sztuczne oświetlenie (Firebaugh i Haynes 2016; Owens i Lewis 2018). Wrażliwe na światło samice *Lampyrus noctiluca* przebywają pod latarniami w czasie trwania godów, przez co nie są zauważane przez samce i tracą możliwość rozmnażania się (Ineichen i Rüttimann 2012). W niektórych przypadkach samice muszą konkurować z latarniami ulicznymi, aby przyciągnąć uwagę samców (Bek 2015). Niektóre owady w sztucznym świetle nie są w stanie rozpoznać pobratymców: pancerze samców chrząszczy z rodziny poświętnikowatych *Coprophanaeus lancifer* odbijają fioletowe fale emitowane przez zachodzące słońce. Na skutek zanieczyszczenia światłem ich połyskujący pancerz staje się mniej widoczny dla samic, co skutkuje znaczącym spadkiem szans na rozmnażanie (Théry i in. 2008; Davies i in. 2013a; Kelley i in. 2019).

ALAN może również bezpośrednio wpływać na sukces reprodukcyjny owadów poprzez zaburzenia fizjologiczne (Honnen i in. 2016). Stała ekspozycja na światło doprowadza samce niektórych gatunków owadów do bezpłodności (Bebas i in. 2001), hamuje wydzielanie żeńskich feromonów płciowych (Fatzinger 1973; van Geffen i in. 2015a) oraz zakłóca składanie jaj u motyli nocnych (Yamaoka i Hirao 1981). Podobnie ekspozycja na słabe światło zmniejsza płodność u wywilżny karłowatej *Drosophila melanogaster* (McLay i in. 2017). Wykazano, że odpowiednia ekspozycja na czerwone lub niebieskie światło



w nocy znacząco zmienia stosunek płci u potomstwa pasożytniczych os (Cochard i in. 2019a, 2019b), co prawdopodobnie dzieje się również u innych gatunków owadów. Faktyczny stosunek płci osobników może dalej ulegać zmianie poprzez wpływ ALAN na behavior. Samce prostoskrzydłych z rodzaju *Hemideina* unikają oświetlonych obszarów, czego nie robią samice (Farnworth i in. 2018), zaś samice piędzika przedzimka *Operophtera brumata* unikają oświetlonych pni drzew (van Geffen i in. 2015b). Generalnie samice motyli nocnych są mniej przyciągane przez sztuczne oświetlenie niż samce (Altermatt i in. 2009; Garris i Snyder 2010; van Geffen i in. 2015b). Również światło spolaryzowane stanowi zagrożenie dla rozmnażania się wielu gatunków owadów. Zanieczyszczenie światłem spolaryzowanym sprawia, że wodne owady składają jaja na nieprzepuszczalnych powierzchniach innych niż tafla wody, np. mokry asfalt (Szaz i in. 2015; Villalobos 2017), co skutecznie dziesiątkuje kolejne pokolenia.

### **Wpływ sztucznego światła na rozwój owadów**

Sztuczne światło w nocy może zakłócać prawidłowy wzrost owadów na różnych stadiach rozwoju. U młodocianych osobników zanieczyszczenie światłem wpływa na pory żerowania, poprzez zahamowanie lub stymulację wydzielania hormonów, regulujących rytmy dobowe (Dominoni i in. 2016; Aulsebrook i in. 2018) oraz metabolizm (Gaston i in. 2017; Ouyang i in. 2018; Russart i Nelson 2018a). U owadów, podobnie jak u innych zwierząt, hormonem związanym z postrzeganiem okresów światła i ciemności jest melatonina (Aubé i in. 2013). Melatonina jest antyoksydantem (Durrant i in. 2019) i jednym z kluczowym sygnałów biologicznych, informujących o porze dnia i roku (Hardeland i Poeggeler 2003). Jej wydzielanie następuje, gdy organizm nie jest narażony na bodźce świetlne, tłumiona jest zaś przez oddziaływanie światła (w szczególności niebieskiego). Jej cykliczne wahania pomagają regulować dobowe rytmy aktywności i spoczynku oraz okołoroczny fotoperiodyzm (Evans i in. 2007; Tan i in. 2010; Desouhant i in. 2019).

Sztucznie wydłużony fotoperiod spowodowany zanieczyszczeniem światłem, skutkuje opóźnieniem w rozwoju owadów zimujących w postaci osobników młodocianych, w tym szarańczy wędrownej *Locusta migratoria* (Tanaka i in. 1993) i wciornastków *Megalurothrips sjostedti* (Ekesi i in. 1999); jednocześnie przyspieszając rozwój biedronek *Coelophora saucia* (Omkar i in. 2006), mszyc *Megoura viciae* (Kehoe i in. 2018) oraz pluskwiaków *Orius sauteri* (Wang i in. 2013). Wywołane obecnością ALAN wydłużenie fotoperiodu i zahamowanie syntezy melatoniny spowalnia rozwój form młodocianych u świerszczy *Teleogryllus commodus* (Durrant i in. 2018), natomiast przyspiesza wzrost pajaków *Eriophora biapicata* (Willmott i in. 2018). Światło o krótkiej fali (światło niebieskie)

stymuluje rozwój poczwerek ćmy piętnówki kapustnicy *Mamestra brassicae* (van Geffen i in. 2014), podczas gdy promieniowanie o dłuższej fali (światło czerwone) nie ma wpływu na ich rozwój. U mszyc wykazujących polifenizm (plastyczność fenotypowa) sezonowy ALAN sprawia, że utrzymują one letnie ubarwienie aż do jesieni (Sanders i in. 2015). Sztuczne światło jest w stanie także stymulować szrotówki kasztanowcowiaczki *Cameraria ohridella* do wyprodukowania większej liczby pokoleń w jednym sezonie (Schroer i in. 2019). Wspomniane zmiany na skutek oddziaływania ALAN będą także powodować stres termiczny, w wyniku doświadczania niższych temperatur w zachwianym cyklu dobowym i okołorocznym. Bez względu na to, w jaki sposób sztuczne światło wpływa na rozwój danego gatunku, zaburzona synchronizacja z innymi elementami środowiska takimi jak klimat, inne zwierzęta, rośliny żywicielskie, źródła pożywienia itp. będzie mieć katastrofalne skutki dla przyszłości populacji owadów na świecie (Boggs i in. 2012; Schenk i in. 2018).

### **Wpływ sztucznego światła na żerowanie owadów**

Sztuczne światło w nocy może również na kilka sposobów zakłócać efektywne żerowanie, niezbędne do prawidłowego rozwoju i rozmnażania (Wenninger i Landolt 2011). Owady aktywne w ciągu dnia i o zmierzchu, na skutek oddziaływania sztucznego światła, kontynuują żerowanie po zmroku, jednocześnie doświadczając stresu termicznego związanego z niższą temperaturą po zachodzie słońca (Urbanski i in. 2012). Zajmują także niszę pokarmową owadów aktywnych nocą, zwiększając konkurencję o pokarm, co przekłada się na mniejszą efektywność żerowania nocnych stawonogów oraz ich gorszą kondycję (Duarte i in. 2019). Owady nocne unikają żerowania w świetle między innymi z powodu wzrostu ryzyka drapieżnictwa ze strony bezkręgowców (Miller i in. 2017), ptaków (Dwyer i in. 2013) oraz owadożernych ssaków (Rydell 2006). Sztuczne światło opóźnia również ich porę rozpoczęcia poszukiwania pokarmu, co przekłada się bezpośrednio na skrócenie czasu żerowania (Tierney i in. 2017). Potwierdzają to również badania laboratoryjne na kilku gatunkach motyli nocnych (van Langevelde i in. 2017), w których wykazano, że zwierzęta narażone na niskie skażenie światłem rzadziej przystępowały do żerowania. Jeden gatunek tasmańskich muchówek jaskiniowych *Arachnocampa tasmaniensis*, których larwy posiadają emitujące światło przynęty do wabienia ofiar, w warunkach zanieczyszczenia światłem, zaprzestaje bioluminescencji, co w konsekwencji prowadzi do braku możliwości żerowania, a nawet głodowania (Merritt i Clarke 2013). Natomiast owady zapylające, które opóźniają rozpoczęcie nocnego żerowania z powodu zanieczyszczenia światłem, mogą ulec desynchronizacji z cyklami roślin żywicielskich, szczególnie gdy otwieranie

kwiatostanów jest aktywowane przez temperaturę, a nie przez światło (Somanathan i in. 2008; Seymoure 2018). Różnice w bodźcach środowiskowych, kluczowych w rozwoju owadów, roślin i ich wzajemnego dostosowania, skutkują coraz silniejszą desynchronizacją w trakcie sezonu wegetacyjnego (Forrest i Thomson 2011; Laube i in. 2014) oraz zmniejszają efektywność zapylaczy (Rafferty i Ives 2012, Knop i in. 2017).

Sztuczne światło w nocy może również powodować kaskady troficzne poprzez zaburzenia wzrostu roślin (Bennie i in. 2016) lub zmianę zachowania drapieżników. Stokłosa eksponowana na światło zwiększa wytrzymałość kutykuli, co skutkuje redukcją żerowania gąsienic sówki perzówki *Apamea sordens* oraz zahamowaniem ich wzrostu (Grenis i Murphy 2018). Sztuczne światło hamuje także kwitnienie grochu (Bennie i in. 2016), co wpływa na redukcję liczebności mszyc *Acyrtosiphon pisum* (Bennie i in. 2018), oraz żerowanie pasożytniczych błonkówek (*Aphidius megourae*, *Lysiphlebus fabarum* i *Aphidius ervi*), które wówczas nie polują (Sanders i in. 2015; Sanders i Gaston 2018). Jeśli mimo zanieczyszczenia światłem pokarmu jest pod dostatkiem a owady pozostają aktywne, ALAN może wciąż wpływać na sukces żerowania. Nienaturalne widma nocnego światła mogą zaburzać niektóre wizualne sygnały, których ćmy zmierzchnice szóstki *Manduca sexta* używają do identyfikacji kwiatów i roślin żywicielskich (Davies i in. 2013a; Streinzer i in. 2019). Owady o fototaksji dodatniej, takie jak wodne pluskwiaki *Lethocerus deyrolli* (Yoon i in. 2010) oraz duże motyle (Somers-Yeates i in. 2013), oślepienie i oszołomienie, zamiast żerować i/lub zapylać rośliny, spędzają całą noc wokół latarni, uwięzione w snopie światła (Macgregor i in. 2015; Knop i in. 2017).

### **Wpływ sztucznego światła na śmiertelność i drapieżnictwo owadów**

Owady, które krążą wokół źródeł sztucznego światła, mogą prędko paść ofiarą drapieżników. Z tego powodu drapieżne stawonogi są zwykle znacznie częściej spotykane w sztucznie oświetlonych siedliskach niż zwierzęta odżywiające się innym rodzajem pokarmu (Davies i in. 2017; Eccard i in. 2018). Podobnie jest z owadożernymi nietoperzami (Russo i in. 2019), szczurami (Yoon i in. 2010), morskimi ptakami (Dwyer i in. 2013), gekonami (Zozaya i in. 2015) oraz ropuchami (González-Bernal i in. 2016), które często żerują w pobliżu sztucznych świateł. Pająki z rodziny krzyżakowatych częściej budują sieci w pobliżu sztucznych świateł, gdzie są w stanie złapać więcej ofiar (Czaczkas i in. 2018). Także dzienne drapieżniki, takie jak skakuny (Frank 2009) czy jaszczurki z rodzaju *Anolis*, są znane z nocnych polowań w sztucznym świetle (Manfrin i in. 2018). Również ptaki polują na wodne owady oszołomione światłem spolaryzowanym (Robertson i in. 2010). Owady narażone na zanieczyszczenie

światłem często nie są w stanie się uchronić przed presją drapieżników. Wiele różnych gatunków nocnych motyli chętnie zbliża się do latarni ulicznych odwiedzanych przez żerujące nietoperze (Acharya i Fenton 1999), gdzie ich zdolność do lotu wymijającego jest zaburzona (Minnaar i in. 2015).

Drapieżniki korzystają nie tylko z dużego zagęszczenia owadów przy sztucznym świetle, ale także z większej widoczności. Jest ona jest szczególnie przydatna dla owadożernych kręgowców, które polują głównie przy użyciu wzroku, np. niektóre ptaki (Dwyer i in. 2013) oraz ryby (Meyer i Sullivan 2013). Także drapieżne owady wykorzystują zanieczyszczenie światłem do zwiększenia sukcesu żerowania, np. mszyce z rodzaju *Acyrtosiphon* częściej padają ofiarami chrząszczy *Coccinella septempunctata*, które w polowaniu kierują się głównie wzrokiem; rzadziej zaś zostają upolowane przez innych przedstawicieli rodzaju *Coccinellidae*, które wykorzystują inne, niż wizualne sygnały do polowania (Miller i in. 2017). Intensywne światło może również redukować drapieżnictwo. Gdy zanieczyszczenie światłem jest zbyt intensywne, drapieżniki żerują rzadziej i mniej efektywnie (Eccard i in. 2018; Sanders i Gaston 2018). Zmiany intensywności i spektrum nocnego światła mogą także zakłócać sygnały wizualne, odgrywające istotną rolę w łańcuchach troficznych, szczególnie w relacji drapieżnik-ofiara. Ubarwienie i pozostałe wizualne sygnały ostrzegawcze wyewoluowały u owadów nocnych tak, by były widoczne w warunkach naturalnego nocnego światła. Natomiast ostrzegawcze sygnały świetlne świetlików (Leavell i in. 2018) oraz ubarwienie ostrzegawcze motyli z rodzaju *Heliconius* (Seymoure i in. 2016) stają się mniej zauważalne w środowisku zanieczyszczonym światłem. Również ubarwienie kryptyczne nocnych stawonogów zostało wykształcone, by pełniło swoją kamuflującą funkcję po zmroku, przez co może stać się nieskuteczne, gdy osobnik znajduje się w oświetlonym środowisku (Davies i in. 2013a; Delhey i Peters 2017). W kontekście drapieżnictwa, zanieczyszczenie sztucznym światłem staje się pułapką ekologiczną, która może spowodować szybkie wyginiecie wielu wrażliwych na światło gatunków owadów (Kokko i Sutherland 2001; Robertson i in. 2018).

### **Jak minimalizować narażenie owadów na zanieczyszczenie światłem?**

Różne gatunki owadów często reagują w odmienny sposób na zanieczyszczenie światłem i wciąż pozostaje wiele aspektów do zbadania. Nie budzi jednak wątpliwości, że sztuczne światło w istotny sposób zaburza funkcjonowanie owadów niemal na każdym etapie życia. Postęp techniki świetlnej eliminuje zagrożenie związane z niebezpiecznie wysoką temperaturą, emitowaną przez tradycyjne żarówki. Natomiast nowoczesne źródła LED niosą ze sobą inne zagrożenia, związane z wysokim udziałem aktywnego biologicznie światła

niebieskiego. Wykorzystanie nowoczesnych technik badawczych, takich jak określanie zmian potencjału elektrycznego oraz kontrolowane badania behawioralne, mogą pomóc znaleźć sposoby zmniejszenia ekologicznych konsekwencji zanieczyszczenia światłem dla owadów, przy jednoczesnym utrzymaniu wystarczających poziomów nocnego oświetlenia dla bezpieczeństwa i komfortu ludzi. Odpowiedzialne użytkowanie oświetlenia, mające na celu ograniczenie spadku liczebności owadów spowodowanego przez ALAN, powinno mieć jak najszersze podejście, zarówno na poziomie rodzaju oświetlenia, jego umiejscowienia oraz czasu emisji (Bruce-White i Shardlow 2011). Źródła LED można zaprojektować tak, by emitowały odpowiednie długości fal elektromagnetycznych, które cechują się najslabszym oddziaływaniem na dziką przyrodę (Pimputkar i in. 2009). Wiele owadów jest wrażliwych na krótkie fale elektromagnetyczne, charakterystyczne dla światła ultrafioletowego, fioletowego oraz niebieskiego. Natomiast podczerwień, światło czerwone i bursztynowe wykazuje najniższe oddziaływanie na owady (Briscoe i Chittka 2001; Lind i in. 2017). Światło bursztynowe i czerwone na tle pozostałych kolorów, powoduje najmniej zachowań związanych z podążaniem do światła (Spoelstra i in. 2015; Donners i in. 2018; Longcore i in. 2018; Seymoure i in. 2019) i najslabiej hamuje produkcję melatoniny (Dauchy 2016 i in.; Russart i Nelson 2018b). Zatem jego użytkowanie może zmniejszyć negatywny wpływ ALAN na fizjologię i rozwój owadów (Saunders 2012; Russart i Nelson 2018b; Desouhant i in. 2019). Jednak wrażliwość owadów na konkretne długości fal elektromagnetycznych nie zawsze jest zgodna z dostosowaniem innych organizmów (Dominoni i in. 2015; Bennie i in. 2016; Seymoure i in. 2019). Aktualnie wiele opraw LED dostępnych na rynku emituje tak silne światło, że ich kolor nie jest szczególnie istotny w kontekście oddziaływania biologicznego. W wielu przypadkach łatwiej, szybciej i taniej jest osłonić, przyciemnić lub wyłączyć źródło światła niż znaleźć konkretny typ żarówki lub filtra wąskopasmowego, które zaspokoją potrzeby ludzi i jednocześnie nie będą negatywnie oddziaływały na dziką przyrodę. Osłony są pewnym rozwiązaniem, ograniczającym emisję światła w przestrzeni, jednak nie eliminują jego szkodliwego oddziaływania w bezpośrednim siedlisku. Owady nieprzemieszczające się na duże odległości, w tym gatunki słodkowodne i samice świetlików, mogą zostać śmiertelnie uwięzione przez dobrze osłoniętą latarnię uliczną (Owens i in. 2019).

Zabiegi mające na celu redukcję narażenia owadów na zanieczyszczenie światłem, powinny skupiać się na: ograniczeniu oświetlanych powierzchni do niezbędnych obszarów, takich jak chodniki czy drogi; przyciemnianie źródeł światła do najniższego dopuszczalnego natężenia oraz zmniejszenie liczby urządzeń instalowanych na obszarach wrażliwych biologicznie i w ich okolicy.

W miejscach atrakcyjnych przyrodniczo, oświetlenie dróg powinno być osłonięte, by zminimalizować wpływ na pobliską dziką przyrodę. Przeżywalność owadów mogą znacząco poprawić również czasowe ograniczenia emisji światła, polegające na wykorzystaniu czujników ruchu do włączania oświetlenia oraz oświetlenie z automatycznymi wyłącznikami czasowymi (Gardiner 2011).

## Podsumowanie

Niektóre szacunki przewidują, że nawet milion gatunków, w tym do 40% owadów, wyginie w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat (IPBES 2019; Sánchez-Bayo i Wyckhuys 2019). Dlatego ważna jest identyfikacja zagrożeń, aby móc im jak najskuteczniej przeciwdziałać. Zanieczyszczenie światłem, w połączeniu z utratą siedlisk, zanieczyszczeniami chemicznymi, gatunkami inwazyjnymi i zmianami klimatycznymi powodują istotny spadek liczby owadów. Jeszcze do niedawna badania skupiające się na spadku liczebności i bioróżnorodności owadów, nie rozpatrywały rosnącego zanieczyszczenia światłem jako istotnego zagrożenia (Gaston 2019). Światło przez miliony lat było stałym czynnikiem środowiska, przy którym ewoluowało życie na ziemi. Zatem antropogeniczne zmiany naturalnego środowiska świetlnego wpływają niemal na wszystkie organizmy na ziemi. Zanieczyszczenie światłem i jego ekologiczne konsekwencje nie ograniczają się tylko do ośrodków miejskich i podmiejskich. Są również szeroko rozpowszechnione wzdłuż dróg na obszarach nieurbanizowanych, w tym na terenach chronionych. Nie ma jednej przyczyny spadku liczebności i różnorodności gatunkowej owadów, jednak każde zidentyfikowane zagrożenie daje szansę na jego minimalizację. Zanieczyszczenie światłem, w przeciwieństwie do innych czynników antropogenicznych, odpowiadających za spadek liczebności owadów, można stosunkowo łatwo wyeliminować, poprzez wyłączenie źródła światła i tym samym przywrócić naturze naturalnego nocnego krajobrazu. Potrzebne są jednak dalsze badania, aby dokładniej określić rolę ALAN w kontekście spadku liczebności owadów, a także opracować technologię oświetlenia bardziej przyjazną dzikiej przyrodzie.

## Literatura

- Dirzo R., Young H.S., Galetti M., Ceballos G., Isaac N.J.B., Collen B., 2014. Defaunation in the anthropocene. *Science* 345: 401–406.
- Acharya L., Fenton M.B., 1999. Bat attacks and moth defensive behaviour around street lights. *Can. J. Zool.* 77: 27–33.
- Agee H.R., 1969. Mating behavior of bollworm moths. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 62: 1120–1122.
- Altermatt F., Baumeyer A., Ebert D., 2009. Experimental evidence for male biased flight-to-light behavior in two moth species. *Entomol. Exp. Appl.* 130: 259–265.

- Altermatt F., Ebert D., 2016. Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biol. Lett.* 12. DOI:10.1098/rsbl.2016.0111.
- Aubé M., Roby J., Kocifaj M., 2013. Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PLoS One* 8: e67798.
- Aulsebrook A.E., Jones T.M., Mulder R.A., Lesku J.A., 2018. Impacts of artificial light at night on sleep: a review and prospectus. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol* 329: 409–418.
- Baker R., 1987. Integrated use of moon and magnetic compasses by the heart-and-dart moth, *Agrotis exclamationis*. *Animal Behaviour* 35: 94–101. DOI:10.1016/S0003-3472(87)80214-2.
- Baxter C.V., Fausch K.D., Saunders C.W., 2005. Tangled webs: reciprocal flows of invertebrate prey link streams and riparian zones. *Freshw. Biol.* 50: 201–220.
- Beavis I.C., 1995. The first light trap, 1st century AD. *Entomol. Rec. J. Var.* 107: 155.
- Bebas P., Cymborowski B., Giebultowicz J.M., 2001. Circadian rhythm of sperm release in males of the cotton leafworm, *Spodoptera littoralis*: in vivo and in vitro studies. *J. Insect Physiol.* 47: 859–866.
- Bek R.J., 2015. *Investigating the Impact of Artificial Night Lighting on the Common European Glow-worm, Lampyrus noctiluca (L.) (Coleoptera: Lampyridae)* (BSc). University of Leeds.
- Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Gaston K.J., 2016. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *J. Ecol.* 104: 611–620.
- Bennie J., Davies T.W., Cruse D., Inger R., Gaston K.J., 2018. Artificial light at night causes top-down and bottom-up trophic effects on invertebrate populations. *J. Appl. Ecol.* 55: 2698–2706.
- Berry R.P., Wcislo W.T., Warrant E.J., 2011. Ocellar adaptations for dim light vision in a nocturnal bee. *J. Exp. Biol.* 214: 1283–1293.
- Briscoe A.D., Chittka L., 2001. The evolution of color vision in insects. *Annu. Rev. Entomol.* 46: 471–510.
- Bruce-White C., Shardlow M., 2011. *A Review of the Impact of Artificial Light on Invertebrates*. Buglife-The Invertebrate Conservation Trust.
- Callahan P.S., 1965. Far Infra-red Emission and Detection by Night-flying Moths. *Nature* 206: 1172–1173.
- Cochard P., Galstian T., Cloutier C., 2019a. The influence of light environment on host colour preference in a parasitoid wasp. *Ecol. Entomol.*
- Cochard P., Galstian T., Cloutier C., 2019b. The proportion of blue light affects parasitoid wasp behavior in LED-extended photoperiod in greenhouses: increased parasitism and offspring sex ratio bias. *Biol. Control* 133: 9–17.
- Coulthard E., Norrey J., Shortall C., Harris W.E., 2019. Ecological traits predict population changes in moths. *Biol. Conserv.* 233: 213–219.

- Czaczkas T.J., Bastidas-Urrutia A.M., Ghislandi P., Tuni C., 2018. Reduced light avoidance in spiders from populations in light-polluted urban environments. *Naturwissenschaften* 105: 64.
- Dacke M., Baird E., Byrne M., Scholtz C.H., Warrant E.J., 2013. Dung beetles use the Milky Way for orientation. *Curr. Biol.* 23: 298–300.
- Dacke M., Byrne M.J., Scholtz C.H., Warrant E.J., 2004. Lunar orientation in a beetle. *Proceedings of the Royal Society of London B* 271: 361–365. DOI:10.1098/rspb.2003.2594.
- Dacke M., Nilsson D.-E., Scholtz C.H., Byrne M., Warrant E.J., 2003. Animal behaviour: Insect orientation to polarized moonlight. *Nature* 424(33). DOI:10.1038/424033a.
- Dauchy R.T., Wren-Dail M.A., Hoffman A.E., Hanifin J.P., Warfield B., Brainard G.C., Hill S.M., Belancio V.P., Dauchy E.M., Blask D.E., 2016. Effects of daytime exposure to light from blue-enriched light-emitting diodes on the nighttime melatonin amplitude and circadian regulation of rodent metabolism and physiology. *Comp. Med.* 66: 373–383.
- Davies T.W., Bennie J., Cruse D., Blumgart D., Inger R., Gaston K.J., 2017. Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages. *Glob. Chang. Biol.* DOI:10.1111/gcb.13615.
- Davies T.W., Bennie J., Inger R., de Ibarra N.H., Gaston K.J., 2013a. Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Glob. Change Biol. Bioenergy* 19: 1417–1423.
- Davies T.W., Bennie J., Inger R., Gaston, K.J., 2013b. Artificial light alters natural regimes of night-time sky brightness. *Sci. Rep.* 3: 1722.
- Degen T., Mitesser O., Perkin E.K., Weiß, N.-S., Oehlert M., Mattig E., Hölker F., 2016. Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. *J. Anim. Ecol.* 85: 1352–1360.
- Delhey K., Peters A., 2017. Conservation implications of anthropogenic impacts on visual communication and camouflage. *Conserv. Biol.* 31: 30–39.
- Desouhant E., Gomes E., Mondy N., Amat I., 2019. Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects: review and prospective. *Entomol. Exp. Appl.* 167: 37–58.
- Dominoni D.M., Borniger J.C., Nelson R.J., 2016. Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms. *Biol. Lett.* 12: 20160015.
- Donners M., van Grunsven R.H.A., Groenendijk D., van Langevelde F., Bikker J.W., Longcore T., Veenendaal E., 2018. Colors of attraction: modeling insect flight to light behavior. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol* 329: 434–440.
- Dreisig H., 1975. Environmental control of the daily onset of luminescent activity in glowworms and fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Oecologia* 18: 85–99.
- Duarte C., Quintanilla-Ahumada D., Anguita C., Manríquez P.H., Widdicombe S., Pulgar J., Silva-Rodríguez E.A., Miranda C., Manríquez K., Quijón P.A., 2019. Artificial light pollution at night (ALAN) disrupts the distribution and circadian rhythm of a sandy beach isopod. *Environ. Pollut.* DOI:10.1016/j.envpol. 2019.02.037.



- Durrant J., Botha L.M., Green M.P., Jones T.M., 2018. Artificial light at night prolongs juvenile development time in the black field cricket, *Teleogryllus commodus*. *J. Exp. Zool.* 12: 202.
- Durrant J., Green M.P., Jones T.M., 2019. Dim artificial light at night reduces the cellular immune response of the black field cricket, *Teleogryllus commodus*. *Insect Sci.* DOI:10.1111/1744-7917.12665.
- Dwyer R.G., Bearhop S., Campbell H.A., Bryant D.M., 2013. Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. *J. Anim. Ecol.* 82: 478–485.
- Eccard J.A., Scheffler I., Franke S., Hoffmann J., 2018. Off-grid: solar powered LED illumination impacts epigeal arthropods. *Insect Conserv. Divers.* 12: 20160111.
- Eisenbeis G., 2006. Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. [in:] Rich C., Longcore T. (eds.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington, D.C.: 281–304.
- Ekesi S., Maniania N.K., Onu I., 1999. Effects of temperature and photoperiod on development and oviposition of the legume flower thrips, *Megalurothrips sjostedti*. *Entomol. Exp. Appl.* 93: 149–155.
- Evans J.A., Elliott J.A., Gorman M.R., 2007. Circadian effects of light no brighter than moonlight. *J. Biol. Rhythms* 22: 356–367.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 2: e1600377.
- FAO, 2012. *FAOSTAT Online Statistical Service*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Farnworth B., Innes J., Kelly C., Littler R., Waas J.R., 2018. Photons and foraging: Artificial light at night generates avoidance behaviour in male, but not female, New Zealand weta. *Environ. Pollut.* 236: 82–90.
- Fatzinger C.W., 1973. Circadian rhythmicity of sex pheromone release by dioryctria abietella (Lepidoptera: pyralidae (Phycitinae) and the effect of a diel light cycle on its precopulatory behavior. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 66: 1147–1153.
- Firebaugh A., Haynes K.J., 2016. Experimental tests of light-pollution impacts on nocturnal insect courtship and dispersal. *Oecologia*. DOI:10.1007/s00442-016-3723-1.
- Forrest J.R.K., Thomson J.D., 2011. An examination of synchrony between insect emergence and flowering in Rocky Mountain meadows. *Ecol. Monogr.* 81: 469–491.
- Foster J.J., Smolka J., Nilsson D.-E., Dacke M., 2018. How animals follow the stars. *Proc. Biol. Sci.* 285. DOI:10.1098/rspb.2017.2322.
- Fox R., Oliver T.H., Harrower C., Parsons M.S., Thomas C.D., Roy D.B., 2014. Longterm changes to the frequency of occurrence of British moths are consistent with opposing and synergistic effects of climate and land-use changes. *J. Appl. Ecol.* 51: 949–957.

- Frank K.D., 1988. Impact of outdoor lighting on moths: an assessment. *J. Lepid. Soc.* 42: 63–93.
- Frank K.D., 2006. Effects of artificial night lighting on moths. [in:] Rich C., Longcore T. (eds.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington, D.C.: 305–344.
- Frank K.D., 2009. *Exploitation of artificial light at night by a diurnal jumping spider*. Peckhamia.
- Gardiner B.O.C., 1995. The very first light-trap, 1565. *Entomologist's Record and Journal of Variation* 45–46.
- Garris H.W., Snyder J.A., 2010. Sex-specific attraction of moth species to ultraviolet light traps. *Southeast. Nat.* 9: 427–434.
- Gaston K.J., 2019. Nighttime ecology: the “Nocturnal problem” revisited. *Am. Nat.* 193: 481–502.
- Gaston K.J., Bennie J., Davies T.W., Hopkins J., 2013. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 88: 912–927.
- Gaston K.J., Davies T.W., Nedelec S.L., Holt L.A., 2017. Impacts of artificial light at night on biological timings. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 48: 49–68.
- Gaston K.J., Holt L.A., 2018. Nature, extent and ecological implications of night-time light from road vehicles. *J. Appl. Ecol.* DOI:10.1111/1365-2664.13157.
- González-Bernal E., Greenlees M.J., Brown G.P., Shine R., 2016. Toads in the backyard: why do invasive cane toads (*Rhinella marina*) prefer buildings to bushland? *Popul. Ecol.* 58: 293–302.
- Goodman L.J., 1965. The role of certain optomotor reactions in regulating stability in the rolling plane during flight in the desert locust, *Schistocerca gregaria*. *J. Exp. Biol.* 42: 385–407.
- Greiner B., Cronin T.W., Ribi W.A., Wcislo W.T., Warrant E.J., 2007. Anatomical and physiological evidence for polarisation vision in the nocturnal bee *Megalopta genalis*. *Journal of Comparative Physiology. A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 193: 591–600. DOI:10.1007/s00359-007-0214-1.
- Grenis K., Murphy S.M., 2018. Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. *Insect Sci.* DOI:10.1111/1744-7917.12574.
- Grubisic M., van Grunsven R.H.A., Kyba C.C.M., Manfrin A., Hölker F., 2018. Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Ann. Appl. Biol.* 173: 180–189.
- Guetté A., Godet L., Juigner M., Robin M., 2018. Worldwide increase in Artificial Light At Night around protected areas and within biodiversity hotspots. *J. Biol. Conserv.* 223: 97–103.
- Hammock B.G., Wetzel W.C., 2013. The relative importance of drift causes for stream insect herbivores across a canopy gradient. *Oikos* 122: 1586–1593.
- Hardeland R., Poeggeler B., 2003. Non-vertebrate melatonin. *J. Pineal Res.* 34: 233–241.
- Henn M., Nichols H., Zhang Y., Bonner T.H., 2014. Effect of artificial light on the drift of aquatic insects in urban central Texas streams. *J. Freshw. Ecol.* 29: 307–318.

- Herzmann D., Labhart T., 1989. Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets: A behavioral study. *Journal of Comparative Physiology* 165: 315–319. DOI:10.1007/BF00619350.
- Honnen A.C., Johnston P.R., Monaghan M.T., 2016. Sex-specific gene expression in the mosquito *Culex pipiens f. molestus* in response to artificial light at night. *BMC Genomics* 17(22).
- Hopkins G.R., Gaston K.J., Visser M.E., Elgar M.A., Jones T.M., 2018. Artificial light at night as a driver of evolution across urban-rural landscapes. *Front. Ecol. Environ.* 114: 8951.
- Hsiao H.S., 1973. Flight paths of night-flying moths to light. *J. Insect Physiol.* 19: 1971–1976.
- Ineichen S., Rüttimann B., 2012. Impact of artificial light on the distribution of the common European glow-worm, *Lampyris noctiluca* (Coleoptera: Lampyridae). *Lampyrid* 2: 31–36.
- IPBES, 2019. [in:] Díaz S., Settele J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Guèze M., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Garibaldi L.A., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razzaque J., Reyers B., Chowdhury R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I.J., Willis K.J., Zayas C.N. (eds.), *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- Jarvis B., 2018. *The Insect Apocalypse Is Here*. The New York Times.
- Kehoe R.C., Cruse D., Sanders D., Gaston K.J., van Veen F.J.F., 2018. Shifting daylength regimes associated with range shifts alter aphid-parasitoid community dynamics. *Ecol. Evol.* 147: 381.
- Kelley J.L., Tatarnic N.J., Schröder-Turk G.E., Endler J.A., Wilts B.D., 2019. A dynamic optical signal in a nocturnal moth. *Curr. Biol.* DOI:10.1016/j.cub.2019.07.005. 0.
- Knop E., Zoller L., Ryser R., Gerpe C., Hörler M., Fontaine C., 2017. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*. DOI:10.1038/nature23288.
- Kokko H., Sutherland W.J., 2001. Ecological traps in changing environments: ecological and evolutionary consequences of a behaviourally mediated Allee effect. *Evol. Ecol. Res.* 3: 603–610.
- Kronfeld-Schor N., Dominoni D., de la Iglesia H., Levy O., Herzog E.D., Dayan T., Helfrich-Forster C., 2013. Chronobiology by moonlight. *Proceedings of the Royal Society London B* 280: 20123088. DOI:10.1098/rspb.2012.3088.
- Kyba C.C.M., 2018. Is light pollution getting better or worse? *Nat. Astron.* DOI:10.1038/s41550-018-0402-7.
- Kyba C.C.M., 2023. Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science* 379: 265–268. DOI:10.1126/science.abq7781.
- Kyba C.C.M., Ruhtz T., Fischer J., Hölker F., 2011a. Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS One* 6: e17307.
- Kyba C.C.M., Ruhtz T., Fischer J., Hölker F., 2011b. Lunar skylight polarization signal polluted by urban lighting. *J. Geophys. Res.* 116: D24106.

- Lall A.B., 1993. Action spectra for the initiation of bioluminescent flashing activity in males of twilight-active firefly *Photinus scintillans* (Coleoptera: Lampyridae). *J. Insect Physiol.* 39: 123–127.
- Laube J., Sparks T.H., Estrella N., Höfler J., Ankerst D.P., Menzel A., 2014. Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development. *Glob. Chang. Biol.* 20: 170–182.
- Leavell B.C., Rubin J.J., McClure C.J.W., Miner K.A., Branham M.A., Barber J.R., 2018. Fireflies thwart bat attack with multisensory warnings. *Sci. Adv.* 4: eaat6601.
- Leuthold R.H., Bruinsma O., van Huis A., 1976. Optical and pheromonal orientation and memory for homing distance in the harvester termite *Hodotermes mossambicus* (Hagen). *Behavioral Ecology and Sociobiology* 1: 127–139. DOI:10.1007/BF00299194.
- Li X., Jia X., Xiang H., Diao H., Yan Y., Wang Y., Ma R., 2019. The effect of photoperiods and light intensity on mating behavior and reproduction of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: tortricidae). *Environ. Entomol.* DOI:10.1093/ee/nvz066.
- Lind O., Henze M.J., Kelber A., Osorio D., 2017. Coevolution of coloration and colour vision? *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 372. DOI:10.1098/rstb.2016.0338.
- Longcore T., Rodríguez A., Witherington B., Penniman J.F., Herf L., Herf M., 2018. Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol.* DOI:10.1002/jez.2184.
- Loughlin D., 2014. UAE: light traps issued to Abu Dhabi farmers for pest control. *International Pest Control* 56: 70.
- Macgregor C.J., Evans D.M., Fox R., Pocock M.J.O., 2017. The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Glob. Chang. Biol.* 23: 697–707.
- Macgregor C.J., Evans D.M., Fox R., Pocock M.J.O., 2017. The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Glob. Chang. Biol.* 23: 697–707.
- Manfrin A., Lehmann D., van Grunsven R.H.A., Larsen S., 2018. Dietary changes in predators and scavengers in a nocturnally illuminated riparian ecosystem. *Oikos.*
- Mazokhin-Porshnyakov G.A., 1960. Why insects fly to light by night. *Revue d'Entomologie de l'URSS* 39: 52–58.
- McLay L.K., Green M.P., Jones T.M., 2017. Chronic exposure to dim artificial light at night decreases fecundity and adult survival in *Drosophila melanogaster*. *J. Insect Physiol.* 100: 15–20.
- Merritt D.J., Clarke A.K., 2013. The impact of cave lighting on the bioluminescent display of the Tasmanian glow-worm *Arachnocampa tasmaniensis*. *J. Insect Conserv.* 17: 147–153.
- Meyer L.A., Sullivan S.M.P., 2013. Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream–riparian invertebrate fluxes. *Ecol. Appl.* 23: 1322–1330.

- Miller C.R., Barton B.T., Zhu L., Radeloff V.C., Oliver K.M., Harmon J.P., Ives A.R., 2017. Combined effects of night warming and light pollution on predator-prey interactions. *Proc. Biol. Sci.* 284. DOI:10.1098/rspb.2017.1195.
- Minnaar C., Boyles J.G., Minnaar I.A., Sole C.L., McKechnie A.E., 2015. Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. *J. Appl. Ecol.* 52: 522–531.
- Narendra A., Reid S.F., Raderschall C.A., 2013. Navigational efficiency of nocturnal *Myrmecia* ants suffers at low light levels. *PLoS One* 8: e58801.
- Owens A.C.S., Cochard P., Durrant J., Farnworth B., Perkin E.K., Brett S., 2019. Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation* DOI:10.1016/j.biocon.2019.108259.
- Owens A.C.S., Lewis S.M., 2018. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: a review and synthesis. *Ecol. Evol.* 8, 11337–11358.
- Perkin E.K., Hölker F., Tockner K., 2014a. Artificial light as a disturbance to light-naïve streams. *Freshw. Biol*
- Perkin E.K., Hölker F., Tockner K., 2014b. The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. *Freshw. Biol.*
- Pimputkar S., Speck J.S., DenBaars S.P., Nakamura S., 2009. Prospects for LED lighting. *Nat. Photonics* 3: 180.
- Potts S.G., Biesmeijer J.C., Kremen C., Neumann P., Schweiger O., Kunin W.E., 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol. (Amst.)* 25: 345–353.
- Rafferty N.E., Ives A.R., 2012. Pollinator effectiveness varies with experimental shifts in flowering time. *Ecology* 93: 803–814.
- Rankin M.A.R., 1985. Migration: Mechanisms and Adaptive Significance. *Contributions in Marine Science* 27 suppl. Marine Science Institute, the University of Texas at Austin, Port Aransas, Tex.
- Reid S.F., Narendra A., Hemmi J.M., Zeil J., 2011. Polarised skylight and the landmark panorama provide night-active bull ants with compass information during route following. *Journal of Experimental Biology* 214: 363–370. DOI:10.1242/jeb.04933
- Robertson B., Kriska G., Horvath V., Horvath G., 2010. Glass buildings as bird feeders: urban birds exploit insects trapped by polarized light pollution. *Acta Zool. Academ. Sci. Hung.* 56: 283–293.
- Russart K.L.G., Nelson R.J., 2018a. Artificial light at night alters behavior in laboratory and wild animals. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol.* DOI:10.1002/jez. 2173.
- Russart K.L.G., Nelson R.J., 2018b. Light at night as an environmental endocrine disruptor. *Physiol. Behav.* 190: 82–89.
- Russo D., Cosentino F., Festa F., De Benedetta F., Pejic B., Cerretti P., Ancillotto L., 2019. Artificial illumination near rivers may alter bat-insect trophic interactions. *Environ. Pollut.* 252: 1671–1677.
- Rydell J., 2006. Bats and their insect prey at streetlights. [in:] Rich C., Longcore T. (eds.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington, D.C.

- Samuel T.F, Sondhi Y., Allen P., Theobald J., Lin H.-T., 2023. *BioRxiv* DOI:10.1101/2023.04.11.536486
- Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K.A.G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers. *Biol. Conserv.* 232: 8–27.
- Sanders D., Gaston K.J., 2018. How ecological communities respond to artificial light at night. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol.* DOI:10.1002/jez.2157.
- Sanders D., Kehoe R., Tiley K., Bennie J., Cruse D., Davies T.W., Frank van Veen F.J., Gaston K.J., 2015. Artificial nighttime light changes aphid-parasitoid population dynamics. *Sci. Rep.* 5: 15232.
- Saunders D.S., 2009. Circadian rhythms and the evolution of photoperiodic timing in insects. *Physiological Entomology* 34: 301–308. DOI:10.1111/j.1365-3032.2009.00699.x.
- Saunders D.S., 2012. Insect photoperiodism: Seeing the light. *Physiological Entomology* 37: 207–218. DOI:10.1111/j.1365-3032.2012.00837.x.
- Schenk M., Krauss J., Holzschuh A., 2018. Desynchronizations in bee-plant interactions cause severe fitness losses in solitary bees. *J. Anim. Ecol.* 87: 139–149.
- Schlaepfer M.A., Runge M.C., Sherman P.W., 2002. Ecological and evolutionary traps. *Trends Ecol. Evol.* 17: 474–480.
- Schowalter T.D., Noriega J.A., Tschardt T., 2018. Insect effects on ecosystem services – introduction. *Basic Appl. Ecol.* 26: 1–7.
- Schultz C.B., Haddad N.M., Henry E.H., Crone E.E., 2019. Movement and demography of At-Risk butterflies: building blocks for conservation. *Annu. Rev. Entomol.* 64: 167–184.
- Seymoure B.M., 2016. *Heliconius In A New Light: The Effects of Light Environments on Mimetic Coloration, Behavior, and Visual Systems* (Ph.D.). Arizona State University.
- Seymoure B.M., 2018. Enlightening butterfly conservation efforts: the importance of natural lighting for butterfly behavioral ecology and conservation. *Insects* 9. DOI:10.3390/insects9010022.
- Seymoure B.M., Linares C., White J., 2019. Connecting spectral radiometry of anthropogenic light sources to the visual ecology of organisms. *J. Zool.* 329: 465.
- Shi L., Vasseur L., Huang H., Zeng Z., Hu G., Liu X., You M., 2017. Adult tea green leafhoppers, *Empoasca onukii* (Matsuda), change behaviors under varying light conditions. *PLoS One* 12: e0168439.
- Shimoda M., Honda K.-I., 2013. Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl. Entomol. Zool.* 48: 413–421.
- Somanathan H., Borges R.M., Warrant E.J., Kelber A., 2008. Visual ecology of Indian carpenter bees I: light intensities and flight activity. *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sens. Neural. Behav. Physiol.* 194: 97–107.
- Somers-Yeates R., Hodgson D., McGregor P.K., Spalding A., Ffrench-Constant R.H., 2013. Shedding light on moths: shorter wavelengths attract noctuids more than geometrids. *Biol. Lett.* 9: 20130376.
- Sotthibandhu S., Baker R.R., 1979. Celestial orientation by the large yellow underwing moth, *Noctua pronuba* L. *Animal Behaviour* 27: 786–800.

- Spoelstra K., van Grunsven R.H.A., Donners M., Gienapp P., Huigens M.E., Slaterus R., Berendse F., Visser M.E., Veenendaal E., 2015. Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 370: 20140129.
- Streinzer M., Roth N., Paulus H.F., Spaethe J., 2019. Color preference and spatial distribution of glaphyrid beetles suggest a key role in the maintenance of the color polymorphism in the peacock anemone (*Anemone pavonina*, Ranunculaceae) in Northern Greece. *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sens. Neural. Behav. Physiol.* DOI:10.1007/s00359-019-01360-2.
- Szaz D., Horvath G., Barta A., Robertson B.A., Farkas A., Egri A., Tarjanyi N., Racz G., Kriska G., 2015. Lamp-lit bridges as dual light-traps for the night-swarmer mayfly, *Ephoron virgo*: interaction of polarized and unpolarized light pollution. *PLoS One* 10: e0121194.
- Tan D.-X., Hardeland R., Manchester L.C., Paredes S.D., Korkmaz A., Sainz R.M., Mayo J.C., Fuentes-Broto L., Reiter R.J., 2010. The changing biological roles of melatonin during evolution: from an antioxidant to signals of darkness, sexual selection and fitness. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 85: 607–623.
- Tanaka S., Hakomori T., Hasegawa E., 1993. Effects of daylength and hopper density on reproductive traits in a Japanese population of the migratory locust, *Locusta migratoria* L. *J. Insect Physiol.* 39.
- Tataroglu O., Emery P., 2014. Studying circadian rhythms in *Drosophila melanogaster*. *Methods* 68: 140–150. DOI:10.1016/j.ymeth.2014.01.001.
- Théry M., Pincebourde S., Feer F., 2008. Dusk light environment optimizes visual perception of conspecifics in a crepuscular horned beetle. *Behav. Ecol.* 19: 627–634.
- Tierney S.M., Friedrich M., Humphreys W.F., Jones T.M., Warrant E.J., Wcislo W.T., 2017. Consequences of evolutionary transitions in changing photic environments. *Aust. Entomol.* 56: 23–46.
- Ugolini A., Boddi V., Mercatelli L., Castellini C., 2005. Moon orientation in adult and young sandhoppers under artificial light. *Proc. Biol. Sci.* 272: 2189–2194.
- Urbanski J., Mogi M., O'Donnell D., DeCotiis M., Toma T., Armbruster P., 2012. Rapid adaptive evolution of photoperiodic response during invasion and range expansion across a climatic gradient. *Am. Nat.* 179: 490–500.
- van Geffen K.G., Groot A.T., Van Grunsven R.H.A., Donners M., Berendse F., Veenendaal E.M., 2015a. Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecol. Entomol.* 40: 401–408.
- van Geffen K.G., van Eck E., de Boer R.A., van Grunsven R.H.A., Salis L., Berendse F., Veenendaal E.M., 2015b. Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conserv. Divers.* 8: 282–287.
- van Geffen K.G., van Grunsven R.H.A., van Ruijven J., Berendse F., Veenendaal E.M., 2014. Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecol. Evol.* 4: 2082–2089.

- van Langevelde F., Braamburg-Annegarn M., Huigens M.E., Groendijk R., Poitevin O., van Deijk J.R., Ellis W.N., van Grunsven R.H.A., de Vos R., Vos R.A., Franzén M., DeVries M.F.W., 2018. Declines in moth populations stress the need for conserving dark nights. *Glob. Chang. Biol.* DOI:10.1111/gcb.14008.
- van Langevelde F., van Grunsven R.H.A., Veenendaal E.M., Fijen T.P.M., 2017. Artificial night lighting inhibits feeding in moths. *Biol. Lett.* 13. DOI:10.1098/rsbl.2016.0874.
- van Strien A.J., van Swaay C.A.M., van Strien-van Liempt W.T.F.H., Poot M.J.M., WallisDeVries M.F., 2019. Over a century of data reveal more than 80% decline in butterflies in the Netherlands. *Biol. Conserv.* 234: 116–122.
- van Veen F.J.F., Morris R.J., Godfray H.C.J., 2006. Apparent competition, quantitative food webs, and the structure of phytophagous insect communities. *Annu. Rev. Entomol.* 51: 187–208.
- Villalobos Jiménez G.J., 2017. *The Impacts of Urbanisation on the Ecology and Evolution of Dragonflies and Damselflies* (Insecta: Odonata) (phd). University of Leeds.
- Wang S., Tan X.L., Michaud J.P., Zhang F., Guo X., 2013. Light intensity and wavelength influence development, reproduction and locomotor activity in the predatory flower bug *Orius sauteri* (Poppius) (Hemiptera: anthocoridae). *Biocontrol* 58: 667–674.
- Warrant E.J., Kelber A., Wallén R., Wcislo W.T., 2006. Ocellar optics in nocturnal and diurnal bees and wasps. *Arthropod Structure & Development* 35: 293–305. DOI:10.1016/j.asd.2006.08.012.
- Warrant E., Dacke M., 2011. Vision and visual navigation in nocturnal insects. *Annual Review of Entomology* 56: 239–254. DOI:10.1146/annurev-ento-120709-144852.
- Wenninger E.J., Landolt P.J., 2011. Apple and sugar feeding in adult codling moths, *Cydia pomonella*: effects on longevity, fecundity, and egg fertility. *J. Insect Sci.* 11: 161.
- White P.J.T., 2018. An aerial approach to investigating the relationship between Macromoths and artificial nighttime lights across an urban landscape. *J. Agric. Urban Entomol.*: 1–14.
- Willmott N.J., Henneken J., Selleck C.J., Jones T.M., 2018. Artificial light at night alters life history in a nocturnal orb-web spider. *PeerJ* 6: e5599.
- Yamaoka K., Hirao T., 1981. Mechanisms of ovipositional behaviour in *Bombyx mori*: time-gating and accumulation of the internal factor. *Int. J. Invertebr. Reprod.* 4: 169–180.
- Yoon T.J., Kim D.G., Kim S.Y., Jo S.I., Bae Y.J., 2010. Light-attraction flight of the giant water bug, *Lethocerus deyrolli* (Hemiptera: belostomatidae), an endangered wetland insect in East Asia. *Aquat. Insects* 32, 195–203.
- Zanieczyszczenie światłem. Identyfikacja i przeciwdziałanie. Poradnik Multidyscyplinarny*, 2022. Light Pollution Think Tank, Stowarzyszenie POLARIS-OPP.
- Zozaya S.M., Alford R.A., Schwarzkopf L., 2015. Invasive house geckos are more willing to use artificial lights than are native geckos: house geckos and artificial lights. *Austral Ecol.* 40: 982–987.



## **Streszczenie**

Na całym świecie odnotowuje się istotny spadek populacji owadów, niosący potencjalnie katastrofalne konsekwencje dla sieci troficznych oraz usług ekosystemowych. Jako przyczyny podaje się najczęściej fragmentację i utratę siedlisk, stosowanie środków ochrony roślin, rozprzestrzenianie się gatunków inwazyjnych oraz zmiany klimatu. Jednak badania wskazują, że także zanieczyszczenie sztucznym światłem może być istotnym czynnikiem redukującym liczebność i różnorodność gatunkową owadów na świecie. Zaburzenie naturalnych cykli światła i ciemności, przy których ewoluowało życie na Ziemi, stanowi ogromne zagrożenie dla dzikiej przyrody, powodując istotne zmiany w dobowych oraz rocznych rytmach funkcjonowania, których konsekwencji nie jesteśmy w stanie dokładnie przewidzieć. Niniejszy rozdział ma na celu wyjaśnienie, jakie są przyczyny gromadzenia się owadów wokół źródeł światła oraz w jaki sposób zanieczyszczenie światłem oddziałuje na elementarne funkcje życiowe tej grupy zwierząt, przyczyniając się do znaczącego spadku ich populacji na świecie. W publikacji zawarto także wskazówki dotyczące odpowiedzialnego użytkowania sztucznego oświetlenia, celem minimalizacji oddziaływania zanieczyszczenia światłem na populacje owadów, co powinno znaleźć zastosowanie w zabiegach ochrony przyrody.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, sztuczne światło, owady, spadek populacji owadów, apokalipsa owadów.

## **Light pollution as a factor responsible for the global insect apocalypse – research review**

### **Summary**

The global insect population is experiencing a rapid decrease, causing unexpected trophic cascades and disturbing ecosystem services. Habitat loss, pesticide use, invasive species, and climate change are considered to be a key driver behind insect declines. However, studies show that artificial light at night (ALAN) can also significantly reduce biomass and insect diversity. For all of evolutionary time, the cycles of light and dark have all remained constant. Light pollution can disturb natural light rhythms in wildlife, causing changes in daily and annual activities, causing significant changes in daily and annual activities. This paper discusses a hypothesis explaining why insects gather at artificial light and how ALAN affect main insects' traits, causing them to decline worldwide. There are also some purposes for how artificial lights can be tuned to reduce their impact on vulnerable populations, and what can be used in nature conservation treatments.

**Key words:** light pollution, artificial light, insects, insect declines, insect apocalypse.

### **Dane kontaktowe autorki:**

**Karolina Skorb**

Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt PAN

Zespół Ekologii Krajobrazu

e-mail: skorb@isez.pan.krakow.pl

**Barbara Wiśniowska-Kielian, Lidia Filipiak, Karolina Kielian**

## **Zanieczyszczenie światłem na przykładzie Krakowa**

### **Wprowadzenie**

Od XX wieku ma miejsce niespotykany wcześniej rozwój nauki oraz postęp techniczny i technologiczny. Równocześnie społeczeństwa zmieniają podejście do problemu zagrożenia otaczającego je środowiska i coraz częściej domagają się ograniczenia oddziaływania na nie niekorzystnych czynników. To wymusiło wdrażanie wielu inicjatyw zmierzających do poprawy jakości środowiska i minimalizowania degradacji, jaka nastąpiła w dobie rewolucji przemysłowej. W ostatnich latach w większym stopniu budzi zainteresowanie zanieczyszczenie powodowane przez sztuczne oświetlenie, ponieważ coraz szersze grono odbiorców zaczęło odczuwać to, że zbyt intensywne, źle dobrane oświetlenie może niekorzystnie wpływać na ich funkcje życiowe.

Zwiększone zapotrzebowania na sztuczne oświetlenie wynika z przyzwyczajenia człowieka do wykorzystywania światła nawet wtedy, gdy jest zbędne, ponieważ jest ono kojarzone z większym poczuciem bezpieczeństwa. Skutkuje to poszukiwaniem nowych, mniej energochłonnych źródeł światła antropogenicznego, ale ich zastosowanie nie zawsze pozostaje bez negatywnego wpływu na środowisko przyrodnicze. Zanieczyszczenie świetlne oddziałuje na stan zdrowia i funkcjonowanie człowieka, zagraża ekosystemowi powodując zanik naturalnie ciemnego nocnego nieba, zaburzenie cyklu życiowego wielu organizmów, dezorientację, a także problemy z rozmnażaniem.

Celem przeprowadzonych badań było udokumentowanie zewnętrznych źródeł zanieczyszczenia światłem w mieście Kraków i określenie, w jakim stopniu są one czynnikami powodującym zagrożenie środowiska.

## **Światło – rola w przyrodzie, skutki zanieczyszczenia**

Światło jest częścią promieniowania elektromagnetycznego, które rozchodzi się w przezroczystym ośrodku materialnym i jest dostrzegalne przez oko człowieka. Światło dzięki swoim właściwościom jest także nośnikiem energii i informacji (Przystawa 2011). Można wyróżnić światło naturalne (emitowane przez słońce, gwiazdy, pioruny, wulkany i niektóre gatunki zwierząt, np. robaczki świętojańskie) oraz sztuczne, nie występujące w naturalnym środowisku, wytworzone przez człowieka (emitowane przez świece, żarówki, diody, lasery, ogniska, itd.).

Światło warunkuje istnienie życia na Ziemi, było obiektem kultu w różnych religiach, a jego źródła wzbudzały zarówno zainteresowanie jak i obawy ludzi. Wywiera wielokierunkowy wpływ na organizmy bytujące w danym środowisku. Postęp cywilizacyjny umożliwił „oswojenie” światła i doprowadził do coraz szerszego jego wykorzystania w życiu codziennym (Roge-Wiśniowska i Tomasik 2015). Momentem przełomowym był XVIII wiek: początek wykorzystywania elektryczności, która znacznie poprawiła warunki życia człowieka i rewolucja jaka nastąpiła w późniejszych latach. Współcześni ludzie nie wyobrażają sobie życia bez światła emitowanego z różnych źródeł. Światło ma wiele zalet, ale zwiększona jego emisja prowadzi do negatywnych skutków, z którymi zmagają się współczesność (Roge-Wiśniowska i Tomasik 2015).

Światło ma wieloraki wpływ na organizmy żywe. W zależności od ilości, kierunku padania oraz intensywności, promieniowanie słoneczne wpływa na tempo wzrostu i rozwoju, ubarwienie, wzrost, migrację, a nawet rozmnażanie (Urbańska i Gierszal 2010). Jego dostępność dla roślin warunkuje fotosyntezę i uwalnianie tlenu w procesie fotolizy wody, produkcję pierwotną biomasy, wzrost, rozwój i długość życia (Schmeil 1917). Rośliny reagują na promieniowanie świetlne dzięki obecności fotoreceptorów, które regulują np. przemieszczanie się auksyn, odpowiedzialnych za fototropizm (Briggs i Olney 2001). Światło warunkuje reakcję roślin na proporcję trwania dnia i nocy, czyli fotomorfogenezę (rośliny, np. owies i koniczyna zakwitają, gdy dzień jest dłuższy niż noc) oraz skotomorfogenezę (inne rośliny, np. ryż, bawełna i soja, zakwitają, gdy noc jest dłuższa niż dzień). Ale kwitnienie niektórych roślin, np. pomidorów czy ziemniaków, nie zależy od długości dnia i nocy (Kowalewska i Mostowska 2015).

Oświetlanie roślin w porze nocnej może prowadzić do następstw zagrażających ich życiu. Światło skierowane bezpośrednio ze znajdujących się w pobliżu nieosłoniętych lub częściowo osłoniętych lamp ulicznych zaburza cykl życiowy roślin, które mogą zbyt szybko zakwitać, przedłużając okres wegetacji

i nie są przygotowane do przejścia w stan spoczynku zimowego, a w efekcie mogą przemarzać i zamierać (Schmeil 1917).

Zwierzęta mają szereg receptorów, dzięki którym odbierają sygnały ze świata zewnętrznego, w tym system fotoreceptorów reagujących na bodźce świetlne. Mogą odbierać kwanty światła przez oczy o różnej budowie (pęcherzykowe, teleskopowe, proste, złożone), ale też przez receptory skórne. Zwierzęta przystosowane do życia w ciemności mają zredukowane receptory jako oczy szczątkowe lub ich nie mają wcale. Światło umożliwia zwierzętom dostrzeganie obiektów i przemieszczanie się, wspomaga prawidłowy metabolizm i rozwój, wpływa na pigmentację i zmianę umaszczenia zależnie od pory roku. Zwierzęta dostosowały swój cykl życiowy, w tym reprodukcję, do dostępności światła, ale jego nadmiar zaburza podstawowe funkcje organizmów i może być przyczyną wielu problemów. Sztuczne światło dezorientuje zwierzęta wodne, np. świeżo wyklute żółwie zamiast do wody kierują się w stronę źródła jaśniejszego światła sztucznego, następuje zmiana tras wędrówek ryb. Oddziałuje także na owady, płazy, ptaki i ssaki, zarówno o dziennym, jak i nocnym trybie życia (Roge-Wiśniewska i Tomasik 2015). Prowadzi to do zagrożenia bioróżnorodności. Wykazano wpływ sztucznego oświetlenia na zooplankton, ograniczający jego migrację i odżywianie, przez co zwiększa się nagromadzenie biomasy glonów i pogarsza jakość wody (Moore i in. 2000).

Człowiek jest też zależny od dostępności światła, które jest niezbędne do życia, poruszania się, rozwoju oraz obserwacji środowiska. Niedobór lub brak odpowiedniej ilości światła może spowodować niekorzystne zmiany w gospodarce hormonalnej, np. wytwarzanie melatoniny, co zakłóca dobowy rytm sen-czuwanie, zaburza percepcję i może wywoływać stany depresyjne. Promienie słoneczne są niezbędne do syntezy witaminy D w organizmie ludzi i zwierząt, a jej niedobór zaburza przyswajanie magnezu i wapnia, zmniejsza odporność, prowadzi do otyłości, cukrzycy i zwiększa ryzyko zachorowania na nowotwory. Jednak nie każdy rodzaj światła oddziałuje pozytywnie na środowisko i istoty żywe, a nadmiar światła antropogenicznego może wpływać niekorzystnie na człowieka oraz zagrażać całemu ekosystemowi (Lisowska i Bryl 2017).

Ludzie coraz częściej dostrzegają problem „zanieczyszczenia światłem”, czyli negatywne oddziaływanie iluminacji na środowisko. Zagadnieniem tym zaczęto interesować się na początku XX wieku, choć nadal jest uważane za relatywnie nowe, ale dostrzega je coraz większa część społeczeństwa. Zanieczyszczenie świetlne ma miejsce, gdy jest wykorzystywane nadmierne oświetlenie, głównie w porze nocnej, zauważalne zwłaszcza w okresie zimowym, kiedy zmierzch nadchodzi wcześniej, a budynki mieszkalne, usługowe, ulice oraz elementy

przyrody są nadmiernie oświetlane. Skutkuje to „zanikiem” naturalnie ciemnego nocnego nieba, pogorszeniem widoczności, rozpraszaniem światła, zaburzeniami snu organizmów, nadmiernym rozdrażnieniem ludzi, a nawet zaburzeniami rozwojowymi i behawioralnymi (Roge-Wiśniewska i Tomasik 2015). Pod koniec lat 80. XX wieku Frans Johan Verheijen (1985) wprowadził podział zanieczyszczenia świetlnego na zanieczyszczenie astronomiczne i o charakterze biologiczno-ekologicznym, nadając im miano fotozanieczyszczeń. Zanieczyszczeniem świetlnym określił brak możliwości obserwacji nocnego nieba przez nadmierne, zbyt intensywne oświetlenie nieba sztucznym światłem (Verheijen 1985; Kołomański i in. 2019).

Nasilające się zanieczyszczenie świetlne oraz obserwacje prowadzone przez naukowców i amatorów, zaowocowały klasyfikacją iluminacji świetlnej. Przy jej tworzeniu brano pod uwagę dostrzegalne „okiem nieuzbrojonym” różnice zachodzące pod wpływem sztucznego światła, jego wpływ na organizmy, ich samopoczucie oraz na środowisko. Wyróżniono: światło niepożądane, zakłócenia świetlne, olśnienie oraz łunę miejską (Roge-Wiśniewska i Tomasik 2015).

Światło niepożądane, inaczej światło zabłąkane, jest to światło przeszkadzające, które wnika przez okna do mieszkań, między innymi ze sztucznego oświetlenia ulicznego (ryc. 1a). Może powodować zaburzenia snu na skutek zbyt długiej ekspozycji organizmu na działanie światła.



Ryc. 1. Kasinka Mała – a) światło zabłąkane, b) olśnienie (fot. Lidia Filipiak).

Olśnienie, inaczej blask, jest to przewymiarowane światło (ryc. 1b). Zbyt intensywne oświetlenie nocne generuje liczne kontrasty i może być przyczyną znacznego ograniczenia widoczności w nocy, doprowadzić do dezorientacji lub chwilowej utraty zdolności widzenia. Olśnienie jest często następstwem nieprawidłowej regulacji świateł pojazdów samochodowych, używania świateł drogowych („długich”) zamiast mijania lub przeciwmgłowych, gdy widoczność nie jest zakłócona przez warunki zewnątrz, np. mgłę lub opady.

Zakłócenie świetlne, nazywane symfonią świateł, jest to zbyt intensywne nagromadzenie źródeł emitujących światło: liczne banery reklamowe, tablice informacyjne oraz znaki drogowe, które mogą doprowadzić do dyskomfortu, utrudnić poruszanie się, a nawet zagrozić bezpieczeństwu w ruchu drogowym, gdy emitowane światło dodatkowo odbija się od nawierzchni drogi. Symfonia świateł stanowi uciążliwość dla prowadzących pojazdy i może być przyczyną niebezpiecznych zdarzeń drogowych.

Łuna miejskiego nieba, nazywana smogiem świetlnym lub sztucznym brzaskiem, jest to emitowane zbędne, nieprawidłowo zaprojektowane sztuczne światło, rozpraszane przez znajdujące się w powietrzu aerozole (substancje zanieczyszczające atmosferę, mgła). Powoduje ono widoczną z dużej odległości łunę świetlną, zwłaszcza nad dużymi aglomeracjami (ryc. 2).



Ryc. 2. Łuna świetlna – a) nad Namiestowem i Trzcianą (Słowacja) widoczna z Babiej Góry (fot. Lidia Filipiak), b) nad Krakowem widoczna ze stoków Śnieżnicy (fot. Karolina Kielian).

Przyczyną narastania problemu zanieczyszczenia świetlnego jest wytwarzane przez ludzi światło antropogeniczne i jego nadmierne wykorzystywanie w różnych celach. Duże znaczenie ma kierunek i natężenie światła, ale też gęstość zaludnienia na danym obszarze: im większa tym większa iluminacja. Wykorzystanie światła jaśniejszego niż jest to konieczne w danych warunkach, nieprawidłowe osłony źródła światła, światło nieprawidłowo skierowane, wywołują łunę świetlną widoczną nad dużymi miastami na tle nocnego nieba. Problem ten generują pojedynczy mieszkańcy, instytucje i duże firmy oświetlając budynki mieszkalne i użyteczności publicznej, obiekty architektoniczne, budynki i obszary przemysłowe czy banery reklamowe, ale też latarnie oświetlające nocą ulice i parki oraz wielobarwne iluminacje świetlne dekorujące budynki mieszkalne i obiekty infrastruktury, a nawet elementy przyrody ożywionej w okresie świątecznym (ryc. 3) (Kotarba 2019).



Ryc. 3. Zanieczyszczenie świetlne spowodowane dekoracjami świątecznymi w Wiedniu (a, b) i w Krakowie (c, d) (fot. Lidia Filipiak).

Warunki atmosferyczne panujące na danym obszarze mają znaczący wpływ na stan nocnego nieba. Pokrywa śnieżna pogłębia problem zanieczyszczenia świetlnego (ryc. 3c i 3d), ponieważ odbija do 85% światła, które rozprasza się w atmosferze i zwiększa poziom jasności nocnego nieba. Zaobserwowano, że im większe stężenie aerozoli rozproszonych w atmosferze, tym wyższy poziom zanieczyszczenia nocnego nieba sztuczną poświatą (Falchi i in. 2016). Na skutek odbicia rozproszonego światła antropogenicznego w atmosferze, kieruje się ono z powrotem ku ziemi i powstaje niebieska poświata, co w jeszcze większym stopniu zaburza widoczność naturalnego nieba. Ulega zakłóceniu naturalna jasność nocnego nieba wynikająca ze zmian faz księżyca i następuje znaczne wydłużenie liczby godzin pełni. Zakłóca to komunikację między organizmami, migrację, żerowanie i rozmnażanie (Davies i in. 2013).

W miastach można wyróżnić obszary o znacznie zróżnicowanym stopniu zanieczyszczenia sztuczną iluminacją w zależności od gęstości zaludnienia. Największe zanieczyszczenie obserwuje się w centrach miast, kolejno w strefie zabudowy wielorodzinnej oraz zabudowy jednorodzinnej. Na obrzeżach miast i na terenach otwartych zanieczyszczenie świetlne jest najmniejsze. Na terenach o zwartej zabudowie nie stwierdzono znaczącego wpływu zachmurzenia na wielkość zanieczyszczenia świetlnego (Karpińska i Kunz 2019, 2020).

## Metody badań

Podstawą oceny zanieczyszczenia świetlnego była dokumentacja fotograficzna wykonana w okresie letnim i zimowym w latach 2022–2023 w godzinach od 20:00 do 23:00, na terenie Krakowa, drugiego co do wielkości miasta w Polsce, o dużej gęstości zaludnienia oraz zwartej zabudowie. Liczba ludności oficjalnie zamieszkałej w Krakowie<sup>1</sup> według stanu na 31 grudnia 2022 roku wyniosła

---

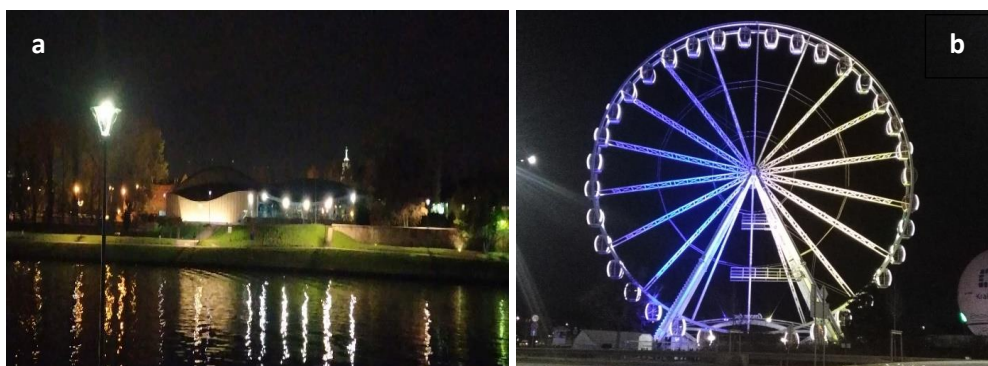
<sup>1</sup> Według danych podanych na stronie: <https://krakow.stat.gov.pl/zakladka2/>.



803 300 osób. Jako Stołeczne Królewskie Miasto, Kraków jest ściśle związany z historią Polski, występują tu liczne obiekty kultury materialnej, często intensywnie iluminowane, w tym budowle sakralne różnych wyznań. Fotografowano obiekty architektoniczne oraz infrastrukturę w rejonach, w których występuje największa emisja sztucznego światła: w dzielnicach Stare Miasto, Nowy Świat, Kazimierz, Czarna Wieś, Nowa Wieś, Krowodrza, Czyżyny, Ludwinów, Podgórze, Łagiewniki – Borek Fałęcki. Zdjęcia stanowiły podstawę analizy i oceny kierunku rozchodzenia się światła w aspekcie zaniku ciemnego nocnego nieba oraz określenia wpływu na otaczające elementy środowiska.

## Wyniki

Aby udokumentować zróżnicowanie emisji sztucznego światła oraz stwierdzić, czy światło jest istotnym czynnikiem zanieczyszczenia miasta, wykonano obszerną dokumentację fotograficzną. Miasto gęsto zaludnione oraz silnie zurbanizowane generuje znaczne ilości światła antropogenicznego, co zostało zobrazowane na rycinach 4–25.



Ryc. 4. Ludwinów: a) Bulwar Poleski – Muzeum Techniki i Sztuki Japońskiej „Manggha” (fot. Lidia Filipiak), b) Bulwar Wołyński – Koło Widokowe „Cracow Eye” (fot. Karolina Kielian).

Zanieczyszczenie światłem przy Muzeum Techniki i Sztuki Japońskiej „Manggha” wynika z zagęszczenia elementów oświetleniowych na budynkach oraz braku odpowiednich osłon na źródłach światła. Infrastruktura jest w całości oświetlona, a strumień światła w dużej części jest skierowany w górę. Latarnie oświetlają drzewa rosnące w bliskim sąsiedztwie (ryc. 4a). Światło na „Cracow Eye” jest ciągłe (ryc. 4a), intensywne, zmieniające barwę, co wywołuje efekt symfonii światła. Duże wzmocnienie światła wywołuje także jego odbicie na powierzchni lustra wody rzeki Wisły, która przepływa przez centralną część miasta, a poświata zwiększa jego zanieczyszczenie świetlne (ryc. 4a i 4b).



Podobne zjawisko obserwuje się w otoczeniu Zamku Królewskiego na Wawelu (ryc. 5–7). Osłony lamp nie zabezpieczają przed emisją światła w różnych kierunkach (ryc. 5a). Pomnik oraz roślinność występująca w bliskim sąsiedztwie są częściowo oświetlone strumieniem światła skierowanym w górę (ryc. 5b).



Ryc. 5. Stare Miasto: a) Bulwar Czerwieński nad Wisłą, b) pomnik Smoka Wawelskiego (fot. Lidia Filipiak).

Wzdłuż podjazdu i podejścia na Wawel oraz wokół murów występują gęsto usytuowane elementy oświetleniowe bez odpowiednich osłon, oświetlają drzewa i krzewy rosnące w bliskim sąsiedztwie, światło odbija się od nawierzchni, co wzmacnia jego oddziaływanie. Baszta i cały fronton Zamku są w całości oświetlone strumieniem światła skierowanym w górę lub pod pewnym kątem (ryc. 6 i 7).



Ryc. 6. Stare Miasto: a) podjazd na Wawel ul. Droga do Zamku, b) Brama Bernardyńska i widok na Basztę Senatorską (fot. Lidia Filipiak).



Ryc. 7. Stare Miasto: a) podejście na Wawel od ul. Powiśle, b) widok na Zamek od ulic: Świętego Idziego i Podzamcze (fot. Lidia Filipiak).

Kościół znajdujący się w niedużej odległości od Wzgórza Wawelskiego: św. Bernarda oraz pw. Nawrócenia św. Pawła, są oświetlone punktowo strumieniem światła skierowanym na fronton i w górę, bez osłonięcia źródła światła (ryc. 8a i 8b). Równie intensywnie jest oświetlona Bazylika na Skałce, a ponadto silny strumień światła jest skierowany na drzewa rosnące wokół tej świątyni (ryc. 8c).



Ryc. 8. Stare Miasto – Kościoły: a) św. Bernarda (ul. Bernardyńska), b) pw. Nawrócenia św. Pawła (ul. Stradomska) (fot. Lidia Filipiak), oraz c) Kazimierz – Bazylika św. Michała Archanioła (Bazylika na Skałce, ul. Skałeczna) (fot. Karolina Kielian).

Światło odbija się od nawierzchni ul. Grodzkiej, a także tworzy się poświata na płycie Rynku Głównego (ryc. 9 i 10). Bazylika Wniebowzięcia Najświętszej Marii Panny (ryc. 9b) jest w całości oświetlona z różnych stron intensywnym światłem nieosłoniętym, skierowanym w górę. Sukiennice są w całości oświetlone światłem skierowanym w górę, zwłaszcza w ich części centralnej (ryc. 10b), podobnie jak budynki wokół Rynku i Wieża Ratuszowa (ryc. 10a). Jest

to skutek gęsto rozmieszczonych elementów oświetleniowych. Widoczna znaczna emisja światła z nadmiernego oświetlenia wewnętrznego mieszkań, sklepów i restauracji (ryc. 9 i 10). Ciągłe, intensywne światło ulega rozproszeniu w zanieczyszczonej i wilgotnej atmosferze (ryc. 10b).



Ryc. 9. Stare Miasto: a) ul. Grodzka, b) widok z ul. Grodzkiej na Rynek Główny (fot. Lidia Filipiak).

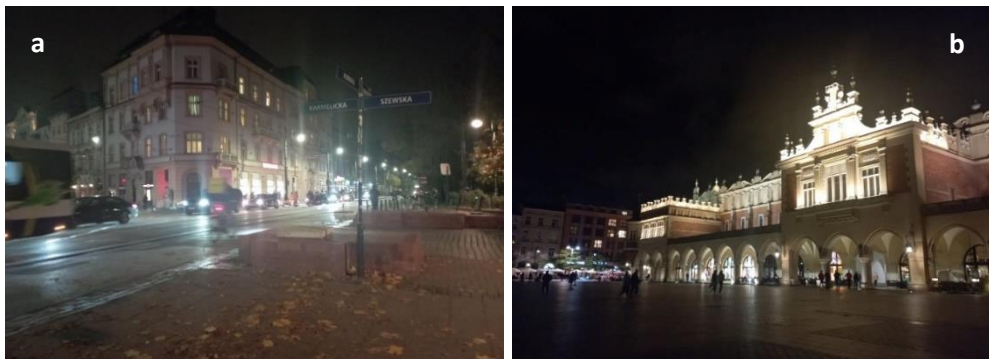


Ryc. 10. Stare Miasto: a) Rynek Główny – widok na Wieżę Ratuszową z ul. Brackiej, b) widok z Placu Mariackiego na Pomnik Adama Mickiewicza i Sukiennice (fot. Lidia Filipiak).

Skrzyżowanie czterech ulic przy Teatrze Bagatela (ryc. 11a) jest silnie rozświetlone, z wyraźną poświatą na ich nawierzchni. Sukiennice od strony ul. Szewskiej (ryc. 11b) są w podobnym stopniu iluminowane jak od strony Placu Mariackiego, ale światło w mniejszym stopniu odbija się od płyty Rynku.

Zanieczyszczenie światłem powodują też iluminacje budynków uczelni wyższych, zlokalizowanych przy Alei Adama Mickiewicza (ryc. 12a i 13) i ul. Czarnowiejskiej (ryc. 12b). Budynki Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH) są w całości intensywnie oświetlone (ryc. 12), źródła światła nie mają odpowiednich osłon, a figura Św. Barbary silnie iluminowana strumieniem światła skierowanym w górę (fot. 12a). Roślinność znajdująca się w bliskim sąsiedztwie obu budynków jest silnie oświetlona z gęsto rozmieszczonych źródeł światła (ryc. 12a i 12b).





Ryc. 11. Stare Miasto: a) skrzyżowanie ulic Podwale, Karmelickiej, J. Dunajewskiego i Szewskiej, b) Rynek Główny z Sukiennicami – widok z ul. Szewskiej (fot. Lidia Filipiak).

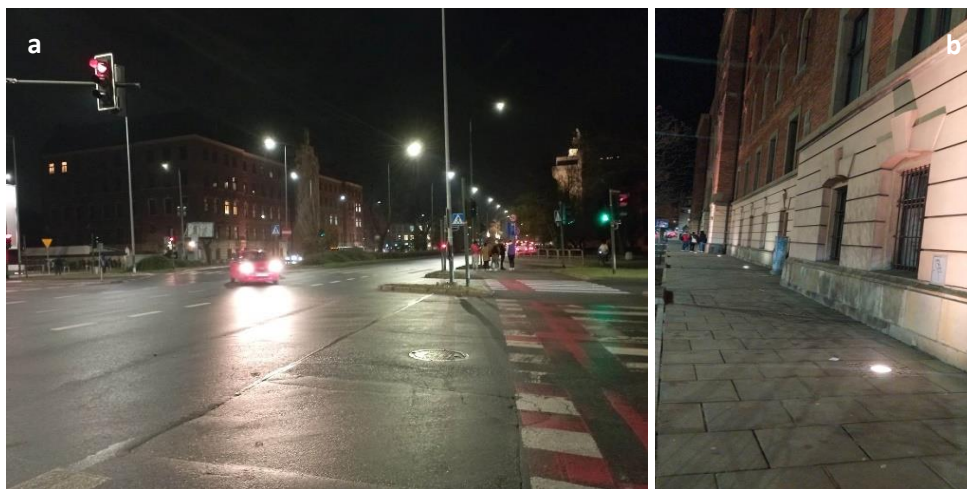
Oświetlenie Collegium Godlewskiego Uniwersytetu Rolniczego jest mniej intensywne, ale lampy umieszczone w chodniku oświetlają fronton budynku i emitują światło pionowo w górę (ryc. 13b).



Ryc. 12. Czarna Wieś – Akademia Górniczo-Hutnicza, a) budynek A-0, b) budynek C-1 Centrum Energetyki (fot. Lidia Filipiak).

Skrzyżowanie Alei i ul. Czarnowiejskiej jest silnie rozświetlone przez gęstą infrastrukturę oświetleniową, z widoczną poświatą na nawierzchni ulic. Podobne zjawisko występuje też na deptaku przy AGH (ryc. 14a) oraz wzdłuż Parku Krakowskiego i Al. Adama Mickiewicza (ryc. 14b i 14c). Emisja z lamp oświetlających te miejsca silnie oddziałuje na roślinność występującą w bliskim ich sąsiedztwie.

Światło emitowane przez lampy pojazdów i sygnalizacji świetlnej oraz latarnie uliczne odbija się na wilgotnej po opadzie nawierzchni ulic i powoduje powstanie symfonii światła, co stanowi poważne zakłócenie prawidłowego widzenia obiektów przez kierujących (ryc. 15).



Ryc. 13. Czarna Wieś: a) skrzyżowanie Al. Mickiewicza i ul. Czarnowiejskiej – w głębi Collegium Godlewskiego Uniwersytetu Rolniczego, b) Collegium Godlewskiego oświetlone lampami w chodniku (fot. Lidia Filipiak).

Nadmierne oświetlenie można zaobserwować także w przypadku obiektów mieszkalnych, hoteli, biurowców i hal widowiskowo-sportowych (ryc. 16 i 17). Dominuje intensywne oświetlenie z nieosłoniętych źródeł światła skierowane w górę, budynki są w całości oświetlone, w tym ze źródeł punktowych usytuowanych na kilku kondygnacjach (ryc. 16 i 17a).



Ryc. 14. Czarna Wieś – deptak przy Akademii Górniczo-Hutniczej (a), Nowa Wieś – Al. Mickiewicza wzdłuż Parku Krakowskiego (b, c) (fot. Lidia Filipiak).

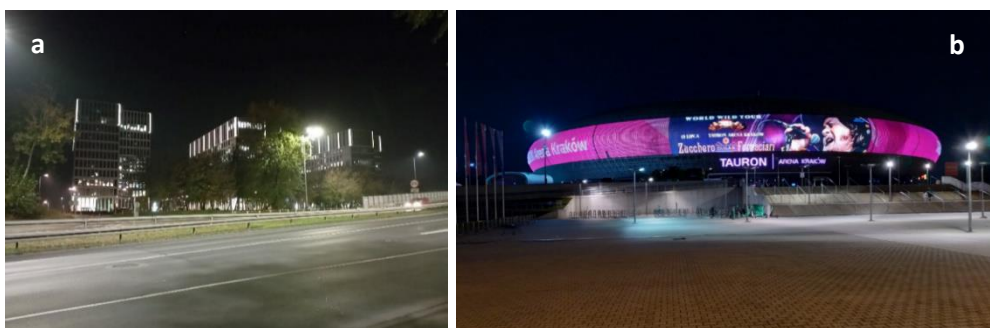
Lampy intensywnie oświetlają drzewa i krzewy rosnące w bliskim sąsiedztwie budynków (ryc. 16a, 16b i 17a). Ciągłe, intensywne światło hali Tauron Arena i licznych latarni w jej pobliżu (ryc. 17b) wywołuje poświatę wokół obiektu oraz rozprzestrzenia się na okoliczne osiedla mieszkaniowe.



Ryc. 15. Czarna Wieś – symfonia świateł, Al. A. Mickiewicza (fot. Lidia Filipiak).



Ryc. 16. Nowy Świat – Kamienica przy Placu Juliusza Kossaka (a), Krowodrza – biurowiec Herbewo, Al. Słowackiego (b) (fot. Lidia Filipiak).



Ryc. 17. Prądnik Biały – biurowce przy ul. Opolskiej, widok z przystanku Imbramowska (a), Czyżyny – wielofunkcyjna hala widowiskowo-sportowa Tauron Arena (b) (fot. Lidia Filipiak).

Intensywnie oświetlenie obiektów występuje też w znacznej odległości od Centrum Krakowa położonego na lewym brzegu Wisły. Na terenie prawobrzeżnego



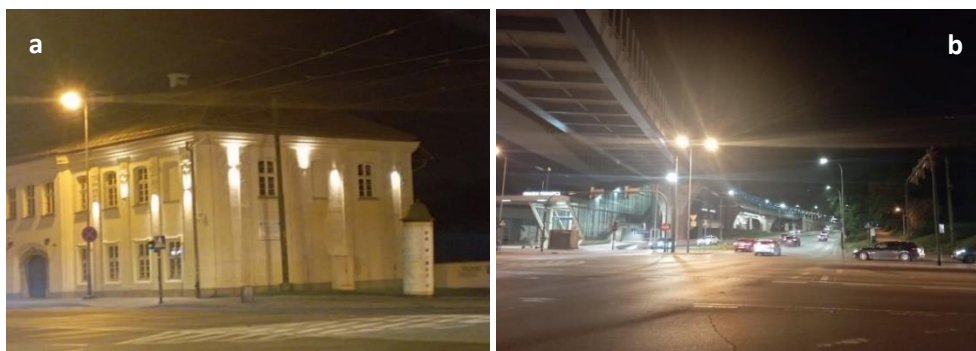
Krakowa, w tym Podgórze, Łagiewnik i Borku Fałęckiego znajduje się wiele silnie iluminowanych obiektów (ryc. 18–25).



Ryc. 18. Podgórze – Rynek Podgórski (a) z krzewem winorośli (b) i Sanktuarium Św. Józefa (c) (fot. Karolina Kielian).

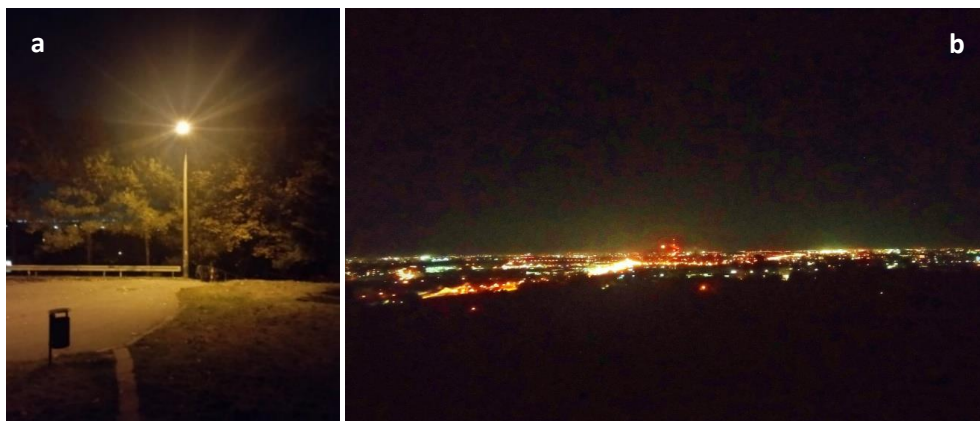
Rynek Podgórski jest tak mocno oświetlony, że siedząc późnym wieczorem na ławce można czytać książkę, a winorośle i okoliczne nasadzenia są doskonale widoczne (ryc. 18a i 18b). Z nieosłoniętych lamp w chodniku strumień światła jest skierowany w górę i oświetla fronton Sanktuarium Św. Józefa aż po najwyższe wieże (ryc. 18c).

Muzeum Podgórze jest w całości intensywnie oświetlone (ryc. 19a), a światło skierowane w górę i w dół z lamp gęsto umieszczonych na budynku, rozjaśnia otaczający teren. Podobnie oświetlenie Szybkiej Kolei Aglomeracyjnej (SKA) silnie rozjaśnia krzyżujące się ulice i odbija się w ich nawierzchni (ryc. 19b).



Ryc. 19. Podgórze – Muzeum Podgórze, ul. Wielicka (a), Szybka Kolej Aglomeracyjna przy skrzyżowaniu ul. Wielickiej i Al. Powstańców Śląskich (b) (fot. Lidia Filipiak).

Brak osłony latarni przy drodze na Kopiec Krakusa powoduje rozprzestrzenianie się światła we wszystkich kierunkach, w tym na blisko rosnące drzewa (ryc. 20a). Z Kopca jest widoczna łuna miejska nad Krakowem, powstająca na skutek rozpraszania zbyt intensywnego światła w aerozolu unoszącym się w powietrzu (ryc. 20b).



Ryc. 20. Podgórze – droga na Kopiec Krakusa, ul. Franciszka Maryewskiego (a), łuna świetlna widoczna nad Krakowem (b) (fot. Lidia Filipiak).

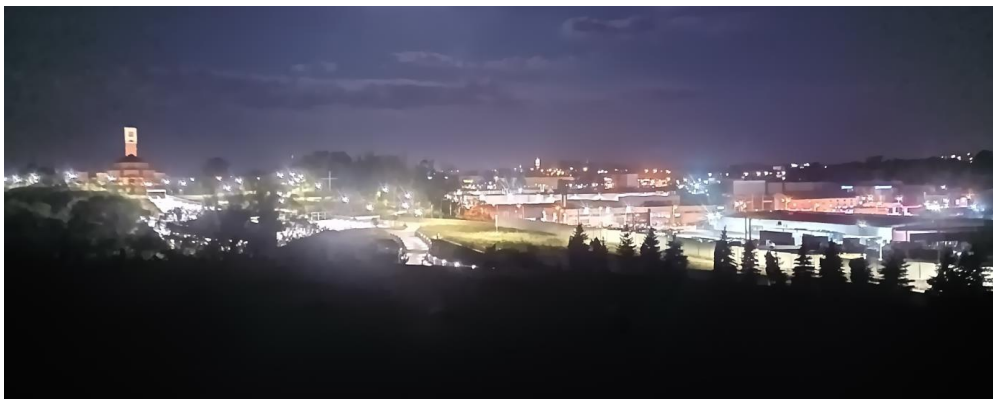
Na terenie Łagiewnik znajduje się Sanktuarium Bożego Miłosierdzia, od wielu lat licznie odwiedzane przez pątników z całego świata (ryc. 21). Zarówno wieża, jak i Bazylika Sanktuarium są oświetlone reflektorami podłogowymi, kierującym światło pionowo w górę.



Ryc. 21. Łagiewniki – a) dolna część Wieży, b) Bazylika Bożego Miłosierdzia (fot. Karolina Kielian).

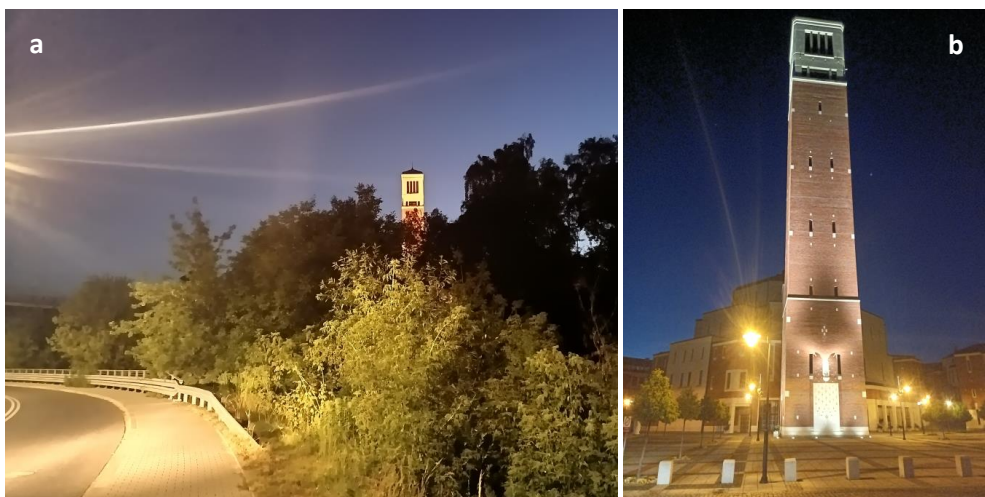
Od ołtarza polowego przy Bazylice (ryc. 22) roztacza się widok na silnie iluminowane obiekty Centrum Handlowego Zakopianka, powstałego po rewitalizacji terenu po byłych Krakowskich Zakładach Sodowych Solvay, obiekty handlowe różnych firm, wieże kościoła p.w. Matki Bożej Zwycięskiej przy ul. Zakopiańskiej, osiedla mieszkaniowe oraz Centrum Jana Pawła II „Nie lękajcie się”. Widoczne chmury są wyraźnie rozjaśnione.





Ryc. 22. Łagiewniki – panorama Łagiewnik i Borku Fałęckiego, widok od ołtarza połowego przy Bazylice Bożego Miłosierdzia (fot. Karolina Kielian).

Centrum Jana Pawła II „Nie lękajcie się” znajduje się na terenie Borku Fałęckiego, z Bazyliką konsekrowaną w 2017 roku. Centrum powstało na zrewitalizowanej części „Białego Morza”, składowiska odpadów wapna posodowego byłych Zakładów Solvay.



Ryc. 23. Borek Fałęcki – droga dojazdowa do Centrum Jana Pawła II „Nie lękajcie się” (a), Wieża Fatimska (b) (fot. Karolina Kielian).

Obiekty architektoniczne Centrum, otaczające je place oraz drogi dojazdowe są intensywnie iluminowane (ryc. 23–25). Ma to znaczący wpływ na roślinność, w tym występujące tu od wielu lat, w efekcie rekultywacji tego terenu, krzewy i drzewa (ryc. 23a i 25a) lub nowe nasadzenia (ryc. 23b, 25b i 25c), na które światło pada bezpośrednio z bardzo licznych latarni, nawet gdy część z nich ma oprawy kierujące światło w bok lub w dół.



Ryc. 24. Borek Fałęcki – Dom Pielgrzyma (a), pomnik Jana Pawła II na terenie Centrum „Nie lękajcie się” (b) (fot. Karolina Kielian).

Wieżę Fatimską (ryc. 23b), Dom Pielgrzyma (ryc. 24a) oraz pomnik Jana Pawła II (ryc. 24b), oświetlają liczne lampy podłogowe kierujące światło pionowo w górę, a jeśli światło jest skierowane w bok lub w dół, dodatkowo odbija się w płytkach, które pokrywają prawie całą powierzchnię wokół budowli, co potęguje rozjaśnienie.



Ryc. 25. Borek Fałęcki – drzewa oświetlone przez latarnie przy drodze dojazdowej do Centrum Jana Pawła II „Nie lękajcie się” (a), przed Domem Pielgrzyma (w tle Centrum Handlowe Zakopianka) (b), przed Muzeum z Wystawą Całunu Turyńskiego (c) (fot. Karolina Kielian).

## Dyskusja

Zanieczyszczenie światłem generuje negatywne skutki, zaburza rytm okołodobowy człowieka i innych organizmów zamieszkujących Ziemię. Organizmy przystosowywały się do określonej długości dnia i nocy, a nadmierne oświetlenie zaburza tę proporcję. Lampy uliczne oświetlające budynki mieszkalne powodują zaburzenia snu, bezsenność, a nawet stany depresyjne mieszkańców, szczególnie w dużych miastach, w których aktywność ludzi nie kończy się, a niekiedy rozpoczyna się o zmroku (m.in. korzystanie z dóbr kultury i rozrywki, spotkania rodzinne, towarzyskie czy biznesowe). Źródła silnego światła generują bardzo jasne, nienaturalne oświetlenie, które może powodować

problemy z poruszaniem się po zmroku czy w prowadzeniu pojazdów, zwłaszcza u osób ze stwierdzoną wadą wzroku – astygmatyzmem (Kotarba 2019; Roge-Wiśniowska i Tomasik 2015). Podobnie wpływa światło emitowane przez telefony komórkowe, laptopy, tablety i smartwatche. Badania wskazują na związek między zachorowaniem na raka i częstym korzystaniem z telefonu komórkowego, ale zdania na ten temat są podzielone (Magiera i Solecka 2019).

Zanieczyszczenie świetlne niekorzystnie wpływa na jakość obserwacji astronomicznych nocnego nieba, podczas gdy przed rewolucją przemysłową ciała niebieskie były jedynym źródłem światła nocnego. Skutki powolnego „zaniku nocnego nieba” są szczególnie widoczne w dużych aglomeracjach miejskich, np. Azji Wschodniej (Japonia, Korea Południowa, Chiny), wschodniego wybrzeża Stanów Zjednoczonych, wybranych krajach zachodniej Europy (Belgia, Holandia, Wielka Brytania), a także wielu miast w Polsce (Falchi i in. 2016). Można je śledzić na bieżąco na stronach internetowych, np. *Light Pollution Map* (<https://www.lightpollutionmap.info>). Problem ten dostrzegają prowadzący badania astronomowie i astrofizycy, ale też amatorzy obserwujący nocne niebo. Coraz trudniej dostrzec obiekty astronomiczne na nocnym niebie, co jest przyczyną zakłóceń i niedoskonałości wyników badań. Aby tego uniknąć, stacje badawcze są przenoszone w miejsca oddalone od dużych aglomeracji, gdzie niebo jest naturalne, niezanieczyszczone sztuczną iluminacją. Przykładem może być Obserwatorium Astronomiczne w Piwnicach oddalonych kilkanaście kilometrów od Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.

Przyzwyczajenie ludzi do ciągłego korzystania z oświetlenia skutkuje zwiększonym pobieraniem energii elektrycznej przez daną jednostkę administracyjną i generuje problemy ekonomiczne, ważne w aktualnej sytuacji związanej z dostępnością nośników energii. Energię elektryczną w Polsce najczęściej produkują elektrownie wykorzystujące przede wszystkim paliwa stałe, które emitują liczne substancje i energię oraz zużywają energię na oświetlenie obiektów elektrowni. Prowadzi to do degradacji środowiska (Michalak 2014). Intensywnie poszukuje się alternatywnych metod wytwarzania energii elektrycznej aby zmniejszyć presję na środowisko, m.in. konwersję fotowoltaiczną, elektrownie wiatrowe czy przeżywające renesans elektrownie wodne (Igliński i in. 2017), w tym coraz więcej uwagi poświęca się wykorzystaniem pływów morskich, jako najbardziej przewidywalnego źródła energii (Samo i in. 2021; Pappas i in. 2023). Jednak ich budowa stanowi znaczącą ingerencję w naturalne środowisko i wywołuje liczne protesty organizacji ekologicznych.

Zanieczyszczenie światłem wpływa na cykl życiowy ludzi, zwierząt i roślin. Oczekuje się, że im więcej światła, tym bardziej efektywny proces fotosyntezy, ale nadmierna iluminacja wywołuje negatywne skutki. Badania dowodzą, że światło w nadmiernej ilości może być nawet zabójcze dla roślin (Kowalewska i Mostowska 2015). Większej iluminacji przepisuje się poprawę bezpieczeństwa, jednak nie wykazano zmniejszenia liczby przestępstw i kolizji drogowych przy intensywnym oświetleniu (Steinbach i in. 2015) lub zwiększenia zgłaszanych wykroczeń po ograniczeniu źródeł światła (Morrow i Hutton 2000).

Oceniono, że 83% społeczeństwa Unii Europejskiej i aż 94% ludności w Polsce, mieszka na terenach zanieczyszczonych światłem. Konsekwencją tego jest zanik nocnego nieba i ludzie nie mają możliwości dostrzeżenia różnicy między niebem nocnym i dziennym. Z tej przyczyny wynikła koncepcja tworzenia parków ciemnego nieba (Zambrzycka-Kościelnicka 2022).

Mimo licznych sposobów oceny poziomu zanieczyszczenie świetlnego nieboskłonu, nie jest określone jednoznacznie, którym powinien kierować się obserwator. W pracy wykorzystano dokumentację fotograficzną oraz obserwację „nieuzbrojonym” okiem, dzięki której można ocenić aktualny stan tego zjawiska (Moore 2001). Na niebie nad Krakowem nie są widoczne wcale lub tylko bardzo słabo, obiekty astronomiczne, z wyjątkiem księżyca. Odnosząc to do stosowanych skal oceny jasności nocnego nieba można ocenić, że niebo nad Krakowem odpowiada 6. lub 5. stopniowi skali Berry’ego (1976) oraz 8. lub 9-stopniowi skali Bortle’a (2001). Wskazuje to na bardzo silne zanieczyszczenie świetlne nieboskłonu.

Coraz częściej wymienia się stosowane dotychczas wysokoprężne lampy sodowe na diody LED, emitujące białe światło. Badania wskazują na zwiększony efekt jasności nieba przez światło emitowane z tego źródła, wynikający z większej wrażliwości oka przystosowanego do ciemności na światło niebieskie i zielone (Luginbuhl i in. 2014; Green i in. 2022). Potwierdza to porównanie zdjęć zanieczyszczenia światłem Mexico City wykonanych z Międzynarodowej Stacji Kosmicznej w 2003 i w 2011, roku po zamianie źródeł światła pomarańczowego na białe diody LED. Największą zmianę powodują diody LED o temperaturze barwowej >4600K, a zwłaszcza >5500K. Wykazano, że widmo poświaty zmieniło się z żółtego na niebieskie (Lamphar i in. 2022). Na światło emitowane z takich źródeł uskarża się społeczeństwo, podobnie jak mieszkańcy krakowskiego rejonu Tauron Arena, na co zwracał już uwagę Ścieżor (2015) w artykule na łamach lokalnej prasy. Stosowanie oświetlenia LED jest jednak uważane za korzystne finansowo i środowiskowo (Kraus i Chair 2016). Należy podkreślić, że problem zanieczyszczenia światłem dotyczy wielu aglomeracji w Polsce,

niezależnie od ich wielkości czy pory roku, czego przykładem mogą być Rzeszów (Wesołowski 2019) i Toruń (Karpińska i Kunz 2019, 2020). Ograniczenie zanieczyszczenia świetlnego można osiągnąć na wiele sposobów (Cyunel i in. 2015).

## **Podsumowanie**

Zakłócenie nocnego nieba w Krakowie jest spowodowane nadmierną iluminacją światłem o dużej intensywności, o strumieniu skierowanym w górę, oświetlającym całe obiekty architektoniczne przez zagęszczone elementy oświetleniowe, nieodpowiednio osłonięte źródła światła, wzmocnione przez odbicie od powierzchni wody rzeki Wisły, płyty Rynku Głównego i nawierzchni ulic. Światło z mieszkań i innych obiektów migruje na zewnątrz. Roślinność, zwłaszcza krzewy i drzewa są narażone na emisję sztucznego światła. Element ten dodatkowo degraduje środowisko już obciążone wieloma innymi czynnikami. Łuna miejska jest widoczna nie tylko nad Krakowem, ale też z odległości kilkudziesięciu kilometrów. Sytuację pogorszyła wymiana żarówek tradycyjnych na LED, zwłaszcza o temperaturze barwowej >4600K, co powoduje niebieską poświatę na nieboskłonie. Światło zewnętrzne migruje do mieszkań i zakłóca nocny wypoczynek mieszkańców.

W wielu przypadkach oświetlenie Krakowa jest nadmierne, co wpływa negatywnie na cały ekosystem miasta. Należy ograniczyć liczbę punktów świetlnych, zwłaszcza w późnych godzinach nocnych, ustalić pory, w których będą włączone iluminacje obiektów oraz instalować czujniki ruchu, dzięki czemu teren będzie oświetlony wtedy, gdy jest to niezbędne. Powinno się zastosować prawidłowe osłony źródeł światła. Ponadto należy edukować mieszkańców Krakowa, dlaczego i jak ograniczać zanieczyszczenie świetlne.

## **Podziękowania**

Badanie uzyskało wsparcie finansowe Centrum Innowacji Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie Sp. z o.o.

## **Literatura**

- Berry R.L., 1976. Light Pollution in Southern Ontario. *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 70(3): 97–115.
- Bortle J.E., 2001. Introducing the Bortle Dark-Sky Scale. *Sky & Telescope* 101: 126–129.
- Briggs W.R., Olney M.A., 2001. Photoreceptors in Plant Photomorphogenesis to Date. Five Phytochromes, Two Cryptochromes, One Phototropin, and One Superchrome. *Plant Physiology* 125: 85–88.
- Cyunel M., Czaplicka A., Stochel-Cyunel J., 2015. Oświetlenie miejskie w kontekście zanieczyszczenia światłem. *Kosmos – Problemy Nauk Biologicznych* 64-4(309): 537–544.

- Davies T.W., Bennie J., Inger R., Gaston K.J., 2013. Artificial light alters natural regimes of night-time sky brightness. *Scientific Reports* 3: 1722. DOI:10.1038/srep01722.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba Ch.C.M., Elvidge Ch.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2(6): e1600377. DOI:10.1126/sciadv.1600377.
- Green R.F., Luginbuhl Ch.B., Wainscoat R.J., Duriscoe D. 2022. The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *Astron Astrophys Rev* 30(1). DOI:10.1007/s00159-021-00138-3.
- Urząd Statystyczny w Krakowie / m. Kraków. <https://krakow.stat.gov.pl/zakladka2/>.
- Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M., Iwański P., Rzymyszkiewicz P., 2017. *Technologie hydroenergetyczne. Monografia*. Wyd. Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 142 s.
- Iwanicki G., 2019. Międzynarodowe społeczności ciemnego nieba jako przykład ochrony nocnego krajobrazu na terenach miejskich. *Czasopismo Geograficzne* 90(1): 18–40.
- Karpińska D., Kunz M., 2019. Light pollution in the night sky of Toruń in the summer season. *Bulletin of Geography, Physical Geography Series* 17: 81–100. DOI:10.2478/bgeo-2019-00017.
- Karpińska D., Kunz M., 2020. Analysis of light pollution of the night sky in Toruń (Poland). *Civil and Environmental Engineering Reports* 30(4): 155–172. DOI:10.2478/ceer-2020-0057.
- Kołomański S., Wiernasz A., Borodacz K., Białek R., Mikołajczyk P., 2019. ALPS – stacje obserwacyjne zanieczyszczenia światłem. [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa: 153–165.
- Kotarba A.Z. (red.), 2019. *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 198 s.
- Kowalewska Ł., Mostowska A., 2015. Dzień i noc w życiu roślin. *Kosmos – Problemy Nauk Biologicznych* 64-3(308): 471–483.
- Kraus L.J., Chair M.D., 2016. Human and Environmental Effects of Light Emitting Diode (LED) Community Lighting. *Report 2-A-16 of the Council on Science and Public Health*. American Medical Association, 9 p.
- Lamphar H., Wallner S., Kocifaj M., 2022. Modelled impacts of a potential light emitting diode lighting system conversion and the influence of an extremely polluted atmosphere in Mexico City. *Urban Analytics and City Science* 49(2): 501–518. DOI:10.1177/23998083211012702.
- Lisowska K.A., Bryl E., 2017. The role of vitamin D in the development of autoimmune diseases. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej* 71: 797–810. DOI:10.5604/01.3001.0010.3857.
- Luginbuhl Ch.B., Boley P.A., Davis D.R., 2014. The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 139: 21–26. DOI:10.1016/j.jqsrt.2013.12.004.
- Magiera A., Solecka J., 2019. Mobile telephony and its effects on human health. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny* 70(3): 225–234. DOI:10.32394/rpzh.2019.0073.

- Michalak J., 2014. Wybrane aspekty oddziaływania elektrowni na środowisko. *Przegląd Elektrotechniczny* 90(10): 152–156.
- Moore C.A., 2001. Visual Estimations of Night Sky Brightness. *The George Wright Forum* 18(4): 46–55.
- Moore M.V., Pierce S.M., Walsh H.M., Kvalvik S.K., Lim J.D., 2000. Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen* 27(2): 779–782. DOI:10.1080/03680770.1998.11901341.
- Morrow E.N., Hutton S.A., 2000. The Chicago Alley Lighting Project: Final Evaluation Report. *Illinois Criminal Justice Information, Authority of the State of Illinois*, 60 s.
- Pappas K., Mackie L., Zilakos I., van der Weijde A.H., Angeloudis A., 2023. Sensitivity of tidal range assessments to harmonic constituents and analysis timeframe. *Renewable Energy* 205: 125–141. DOI:10.1016/j.renene.2023.01.062.
- Przystawa J., 2011. *Odkryj smak fizyki*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 392 s.
- Roge-Wiśniowska M., Tomasiak K. (red.), 2015. Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem. *Prace i Studia Geograficzne*. Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, 190 s.
- Samo K.A., Baharun A., Rigit A.R.H., 2021. The Development of a Preliminary Design for a Tidal Energy Plant. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 1(1): 6730–6733.
- Schmeil O., 1917. *Świat Roślinny*. Wydawnictwo M. Arcta, Warszawa, 276 s.
- Steinbach R., Perkins Ch., Tompson L., Johnson S., Armstrong B., Green J., Grundy Ch., Wilkinson P., Edwards P., 2015. The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. *Journal of Epidemiology and Community Health* 69: 1118–1124.
- Ścieżor T., 2015. Oślepiający róż Areny nie pozwala spać mieszkańcom. *Dziennik Polski*. 23 lutego 2015 r.
- Urbańska M., Gierszał H., 2010. Światło nie zawsze prowadzi do celu – kilka słów o wpływie sztucznego oświetlenia na przyrodę. *Wszechświat – Pismo Przyrodnicze* 111(7–9): 190–196.
- Verheijen F.J., 1985. Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with. Incidents, causation, remedies. *Journal of Experimental Biology* 44(1): 1–18.
- Wesołowski M., 2019. Impact of light pollution on the visibility of astronomical objects in medium-sized cities in Central Europe on the example of the city of Rzeszów, Poland. *Journal of Astrophysics and Astronomy* 40(20). DOI:10.1007/s12036-019-9586-1.
- Zambrzycka-Kościelnicka E., 2022. Pod nocnym, rozgwieżdżonym niebem. Po co nam park ciemnego nieba? *National Geographic Polska*. <https://www.national-geographic.pl/artykul/pod-nocnym-rozgwiezdzonym-niebem-po-co-nam-park-ciemnego-nieba-220816015626>.

## **Streszczenie**

Rozwój technologii oraz infrastruktury technicznej przyczynił się do rozprzestrzeniania zanieczyszczenia, jakim jest nadmierna iluminacja świetlna. W nowej, zagęszczonej zabudowie zaczęto stosować oświetlenie o intensywnym, źle osłoniętym źródle światła. Spowodowało to zanik naturalnego nocnego nieba, rozregulowanie dobowego cyklu organizmów oraz problemy zdrowotne. Celem badań było udokumentowanie i stwierdzenie, w jakim stopniu światło antropogeniczne jest czynnikiem zanieczyszczenia środowiska w mieście Kraków. W oparciu o dokumentację fotograficzną wykonaną w różnych dzielnicach miasta okazało się, że światło jest wykorzystywane w nadmiernej ilości, powoduje liczne problemy środowiskowe i staje się istotnym elementem degradującym środowisko. Głównym czynnikiem powodującym nasilenie tego zjawiska okazały się zagęszczone punkty świetlne, o agresywnym świetle, o intensywnej barwie i nieprawidłowych osłonach, często kierujące światło pionowo w górę. Ten stan pogarsza zastąpienie lamp tradycyjnych przez diody LED. Obiekty astronomiczne nad Krakowem, z wyjątkiem księżyca, są niewidoczne lub słabo widoczne, niezależnie od odległości od centrum miasta. Kraków okazał się miastem o dużym antropogenicznym zanieczyszczeniu światłem, w którym duża gęstość zaludnienia i zurbanizowanie oraz coraz bardziej zagęszczone elementy oświetleniowe powodują zanik naturalnie ciemnego nieba.

**Słowa kluczowe:** iluminacja świetlna, zanieczyszczenie światłem, naturalne ciemne niebo, środowisko.



## **Light pollution on example of Cracow**

### **Summary**

The development of technology and infrastructure has contributed to the spread of pollution, which is excessive light illumination. In the new, dense buildings, lighting with an intense, poorly shielded light source began to be used. This resulted in the disappearance of the natural night sky, dysregulation of the daily cycle of organisms and health problems. The aim of the research was to document and determine to what extent anthropogenic light is a factor in environmental pollution in the city of Cracow. Based on the photographic documentation made in various districts of the city, it turned out that light is used in excessive amounts, causes numerous environmental problems and becomes an important factor degrading the environment. The main factor causing the intensification of this phenomenon turned out to be concentrated light points with aggressive light, intense color and incorrect covers, often directing the light vertically upwards. This state is worsened by replacing the lamps with LEDs. Astronomical objects over Cracow, with the exception of the Moon, are invisible or barely visible, regardless of the distance from the city center. Cracow turned out to be a city with high anthropogenic light pollution, where high population density and urbanization as well as increasingly dense lighting elements cause the disappearance of the naturally dark sky.

**Key words:** light illumination, light pollution, natural dark sky, environment.

### **Dane kontaktowe autorek:**

**Barbara Wiśniowska-Kielian**

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie  
Wydział Rolniczo-Ekonomiczny  
e-mail: rrkielia@cyf-kr.edu.pl

**Lidia Filipiak**

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie  
Wydział Rolniczo-Ekonomiczny  
e-mail: lidia.filipiak@student.urk.edu.pl

**Karolina Kielian**

Zespół Szkolno-Przedszkolny w Balicach  
e-mail: karolina.kielian@balice.edu.pl

**Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz**

## **Przestrzenna i czasowa analiza zanieczyszczenia sztucznym światłem miejskiego nieba na przykładzie Torunia**

### **Wprowadzenie**

Na pogarszający się stan współczesnego ekosystemu miejskiego wpływa kilka czynników degradujących zarówno tych, które poznano już dobrze, jak i będących jeszcze na etapie rozpoznania istotności wpływu i zasięgu oddziaływania. Zmiany jakości środowiska przyrodniczego, ich ocena oraz kierunek przemian są obiektem licznie podejmowanych przez zespoły ekspertów badań o charakterze interdyscyplinarnym. W działaniach tych koniecznością stało się nie tylko poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych metod rejestrujących służących przeprowadzeniu samych pomiarów, ale także zwiększenie zainteresowania realizacją ukierunkowanego i zdalnego monitoringu czynników negatywnie wpływających na środowisko. Dzięki temu powstają urządzenia oraz zintegrowane technologie pozwalające nie tylko na pomiar wartości danej zmiennej, ale i na przetwarzanie danych, wizualizację wyników i ich efektywne archiwizowanie. Dzisiejszy stan wiedzy, dotyczący degradacji środowiska w połączeniu z nowoczesną technologią *Przemysłu 4.0*, pozwala na optymalizację procesu pomiarowego w taki sposób, aby możliwe było jeszcze skuteczniejsze poznanie skali zjawiska wraz z dokładniejszym określeniem zmienności, zasięgu i czynników wpływających. Ta interakcja przyczynia się do lepszego ukierunkowania badań i zautomatyzowania samego procesu pomiarowego, co skutkuje pozyskaniem nowych informacji i docelowo pełniejszej wiedzy dotyczącej wpływu danego czynnika na zdrowie i życie roślin, zwierząt oraz funkcjonowanie człowieka.

Współcześnie jednym z coraz bardziej wnikliwie badanych zjawisk, mających istotny wpływ na ekosystem człowieka, jest zanieczyszczenie światłem (Falchi i in. 2016; Jechow i in. 2017; Linares i in. 2020). Definiowane jest ono jako nadmierna emisja sztucznego światła w nocy w dłuższym okresie czasu (Szlachetko 2022). Zjawisko to wywołane jest przede wszystkim przez nieumiejętnie bądź niepoprawnie zaprojektowane lub zamontowane oświetlenie zewnętrzne. Wzmacnia je także obecność rozświetlonych neonów oraz nadmiernego podświetlenia elementów architektonicznych. Czynniki te powodują nadmierną emisję światła w nocy, czego konsekwencją są nie tylko większe koszty ekonomiczne, ale i doświetlanie przestrzeni w górnym kierunku, która nie powinna być tym procesem objęta (Kołomański 2015). Wiele przeprowadzonych badań naukowych udowadnia, że długotrwałe przebywanie na obszarze zanieczyszczonym światłem powoduje wiele negatywnych konsekwencji dla zdrowia i życia zarówno roślin, zwierząt, jak i człowieka (Lacoeuilhe 2014; Macgregor i in. 2016; Longcore i in. 2017; Garcia-Saenz i in. 2018; Adams i in. 2019; Jechow i Hölker 2019). Przeprowadzone badania nad wspomnianym zjawiskiem na terenach zurbanizowanych pokazują również, iż zanieczyszczenie światłem dodatkowo wzrasta podczas występowania niesprzyjających warunków atmosferycznych, takich jak mgły czy zachmurzenie oraz przy zwiększonej obecności w troposferze pyłów pochodzenia antropogenicznego (Ścieżor i in. 2010; Ribas i in. 2016; Kocifaj i Bará 2020; Ścieżor 2020).

Zjawisko zanieczyszczenia nieba sztucznym światłem ma dzisiaj charakter globalny, a w ostatnich dekadach wraz z rozwojem przemysłu oraz postępującym procesem urbanizacji systematycznie zwiększa zasięg przestrzenny oddziaływania (Falchi i in. 2016). Prawo człowieka do korzystania z ciemnego nieba jest niepodważalne, dlatego w celu jego ochrony a w konsekwencji poprawy zdrowia i funkcjonowania człowieka w porze nocnej, liczne organizacje rządowe i pozarządowe, jednostki naukowe oraz podmioty społeczne postawiły sobie za cel na najbliższe lata przemyślaną edukację osób wszystkich grup wiekowych (*Light pollution reduction measures in Europe 2022; International Dark-Sky Association 2022; Szlachetko 2022*). Inną inicjatywą jest tworzenie miejsc ochrony ciemnego nieba, jako należących do najbardziej naturalnych elementów otaczającego nas świata i warto to podkreślać oraz promować (*International Dark-Sky Association 2022; Karpińska i Kunz 2020a*). W niektórych krajach Europy rozpoczęto także wprowadzanie formalnych regulacji dotyczących zewnętrznych emisji sztucznego światła (*Light pollution reduction measures in Europe 2022; Szlachetko 2022*), a w kilku innych, takich jak Chorwacja, Niemcy czy Francja wprowadzono także prawo chroniące środowisko przez skutkami zanieczyszczenia światłem. Wspomniane przykłady należą jednak do wyjątków. Zdecydowana większość

państw nie posiada regulacji prawnych w tym zakresie, a także mało miejsca poświęca nagłośnieniu tego problemu współczesnych miast oraz właściwej edukacji prowadzonej od najmłodszych lat.

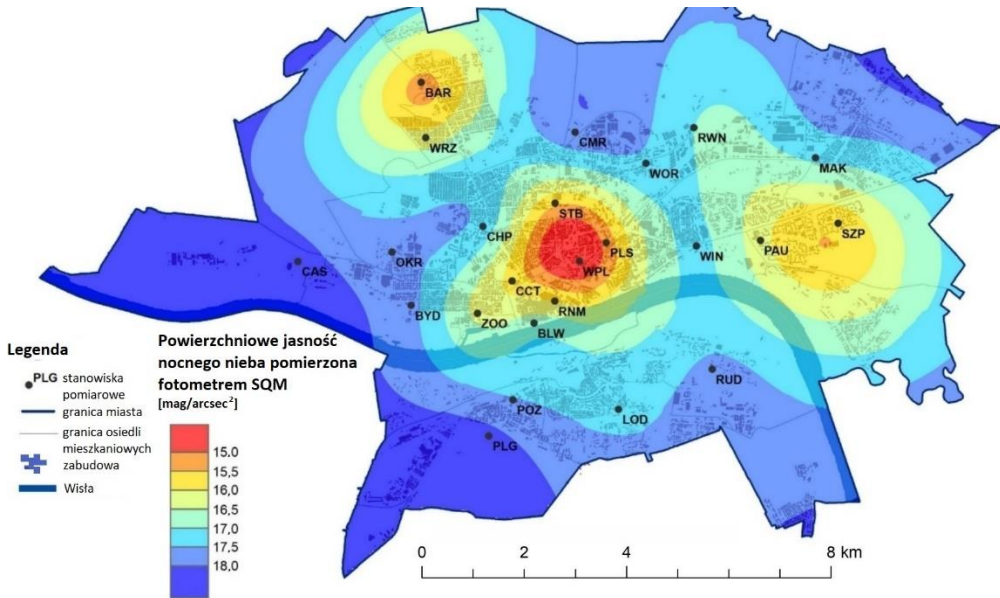
Treść rozdziału omawia wyniki uzyskane podczas realizacji ponaddwuletnich ciągłych i ukierunkowanych pomiarów zanieczyszczenia światłem nocnego nieba nad obszarem Torunia. Miasto Toruń jest przykładem średniej wielkości jednostki osadniczej (o powierzchni około 116 km<sup>2</sup> i liczbie mieszkańców nieprzekraczającej dzisiaj 180 tys.), której władarze nie zwracali dotychczas uwagi na stan funkcjonowania zewnętrznego oświetlenia drogowego i użytkowego. Wszystkie przetworzone dane zostały pozyskane automatycznie przez autorskie urządzenia pomiarowe działające bezprzewodowo w sieci monitoringu (Karpińska i Kunz 2022). Testowanie systemu w naturalnych warunkach miejskich realizowano w 2020 roku, natomiast w pełni operacyjne działanie sieci monitoringu zanieczyszczenia światłem rozpoczęło się na początku 2021 roku i od tego momentu sieć jest sukcesywnie rozbudowywana o nowe urządzenia pomiarowe, a długość ciągłej serii obserwacyjnej z miesiąca na miesiąc wydłuża się.

### **Sieć monitoringu zanieczyszczenia światłem w Toruniu**

Na obszarze Torunia pionierskie pomiary zanieczyszczenia światłem nocnego nieba zrealizowano w latach 2017–2018 roku przy wykorzystaniu ręcznych fotometrów SQM-L firmy Unihedron (Karpińska i Kunz 2019, 2020). Wynikiem tych prac było między innymi pierwsze poznanie rozkładu przestrzennego zanieczyszczenia światłem w mieście oraz zestawienie wartości średnich uzyskanych w okresie kolejnych 12 miesięcy, co przedstawiono na rycinie 1.

Zdobyte doświadczenie podczas tych manualnych rejestracji pozwoliło na zaplanowanie i realizację projektu badawczego, którego efektem było powstanie automatycznej sieci monitoringu, a głównym zaś celem długookresowa systematyczna rejestracja na stałych stanowiskach pomiarowych. W ten sposób możliwe było poznanie zmienności czasowej i przestrzennej smogu świetlnego oraz identyfikacja głównych czynników wpływających na pogorszenie się jakości nocnego nieba. Badane zjawisko charakteryzuje się zmiennością w zależności nie tylko od istniejących źródeł sztucznego światła, ale i lokalnych warunków atmosferycznych i występującej w chwili rejestracji fazy księżyca. Wyniki uzyskane w bezchmurne, bezksiężycowe noce znacznie różnią się od wartości uzyskanych w pochmurne noce, w szczególności na terenach zurbanizowanych. Podczas nocy o zmiennym zachmurzeniu uzyskane wyniki na różnych stanowiskach, nawet w stosunkowo bliskiej odległości wzajemnej, mogą znacznie się różnić, jeśli będą wykonywane w różnym czasie podczas jednej nocy. Z tego

względem bardzo ważna jest jednoczesność pomiarów na wszystkich stanowiskach założonych na analizowanym obszarze.



Ryc. 1. Rozkład powierzchniowej jasności nocnego nieba w Toruniu w okresie 2017–2018, opracowany na podstawie pomiarów z wykorzystaniem ręcznego fotometru SQM-L (Karpińska i Kunz 2020).

Wszystkie etapy projektowania, budowy i eksploatacji założonej w Toruniu automatycznej sieci pomiarowej opartej o własnej konstrukcji urządzenia rejestrujące zostały opisane w innym rozdziale niniejszej monografii, zatytułowanym „Pomiar zanieczyszczenia światłem nocnego nieba – od demonstratora technologii do systemu monitoringu”.

### **Analiza danych pomiarowych zanieczyszczenia światłem nocnego nieba**

Szczegółowej analizie poddane zostały dane pomiarowe rejestrowane od początku 2021 roku do końca grudnia 2022 roku. W okresie tym sieć monitoringu była systematycznie rozbudowywana o kolejne urządzenia pomiarowe. W 2023 roku planowana jest na obszarze Torunia dalsza jej rozbudowa, zwłaszcza w środkowej części miasta, zarówno o nowe urządzenia pomiarowe (do około 40 stanowisk terenowych), jak i o bramy dostępne (łącznie do 6 urządzeń). Dzięki temu miasto będzie pokryte pełną siecią pomiarową, o takiej gęstości rejestratorów, której nie ma żadna inna jednostka osadnicza na świecie.

Zebrane dane w okresie dwóch lat użytkowania sieci monitoringu pozwoliły już na określenie kilku elementów, w tym zmienności sezonowej wyników,

zależności jasności nocnego nieba od warunków meteorologicznych, przedstawienie rozkładu przestrzennego zjawiska smogu świetlnego oraz porównanie zebranych danych do wyników uzyskanych w miejscach oddalonych od wpływu aglomeracji miejskiej.

### **Sezonowa zmienność zanieczyszczenia światłem nocnego nieba**

W celu sprawdzenia występowania różnic między pomiarami powierzchniowej jasności nocnego nieba w odniesieniu do astronomicznych pór roku, wszystkie zebrane dane zostały podzielone z uwzględnieniem sezonu obserwacyjnego. Dla każdego z nich obliczono średnią arytmetyczną wyników rejestracji, oraz podano wartość maksymalną i wartość minimalną. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawia Tabela 1. Średnie wartości w okresie analizy wyliczono na podstawie ponad 46 000 zarejestrowanych danych, a na każdy punkt przypadało średnio 1 700 pomiarów. W sezonie letnim średnią wartość dla wszystkich punktów uzyskano na podstawie ponad 9 900 zebranych danych, w jesiennym odpowiednio 12 000, zimowym 12 200 a wiosennym 15 500. Różnica w tych liczebnościach wynika z różnych dat rozpoczęcia pracy poszczególnych urządzeń pomiarowych, które systematycznie były dołączane do sieci monitoringu.

Otrzymane średnie, maksymalne oraz minimalne wartości powierzchniowej jasności nocnego nieba dla Torunia zostały także przedstawione graficznie, co dokumentuje rycina 2. Analiza ta została przygotowana z wykorzystaniem oprogramowania ArcGIS (Esri) i interpolacji geostatystycznej metodą *Empirical Bayesian Kriging*. Metoda ta wykorzystywana jest także do mało licznych zbiorów danych wejściowych. Za pomocą tego samego narzędzia przedstawiono także rozkłady przestrzenne w Toruniu średnich wartości w podziale na poszczególne astronomiczne pory roku (ryc. 3).

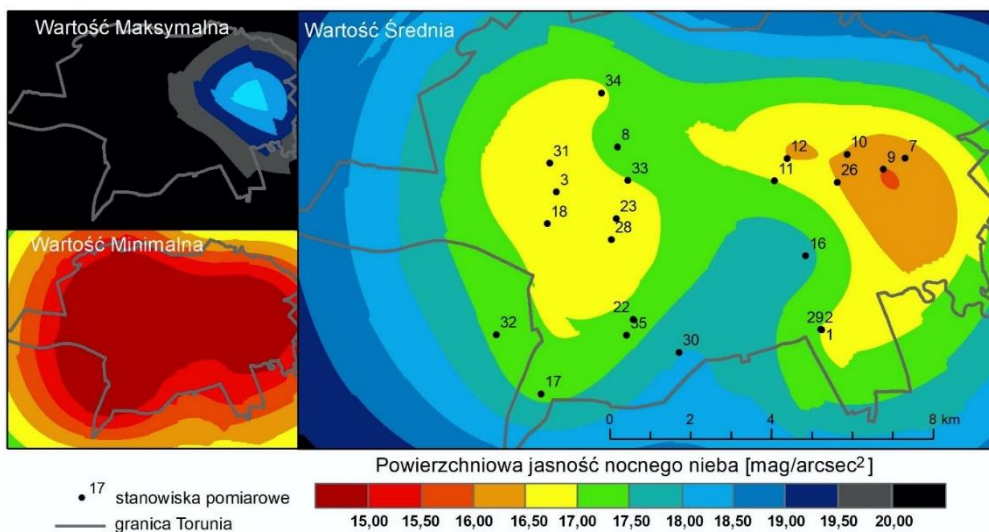
Analizując przedstawione na rycinach 2 i 3 wyniki analiz interpolacyjnych można stwierdzić, iż najwyższe wartości średnie powierzchniowej jasności nocnego nieba pokrywają się z zasięgami największych osiedli mieszkaniowych Torunia. Wschodnia część miasta charakteryzuje się występowaniem gęstej zabudowy wielorodzinnej, poszatkwanej siecią ulic z licznymi stanowiskami oświetlenia ulicznego i użytkowego. Wysokie wartości zanieczyszczenia światłem występują także w zachodniej części Torunia, tam także zlokalizowane są starsze osiedla mieszkaniowe, charakteryzujące się zwartą i niewysoką zabudową. Odnosząc się do przedstawienia średniej wartości danych w podziale na astronomiczne pory roku, widać wyraźnie, iż największe rejestrowane zanieczyszczenie światłem występuje zimą, natomiast najmniejsze latem.

Tabela 1. Zestawienie średnich wartości pomiarów powierzchniowej jasności nocnego nieba, zarejestrowanych na stanowiskach monitoringowych w ujęciu całego roku oraz poszczególnych astronomicznych pór roku.

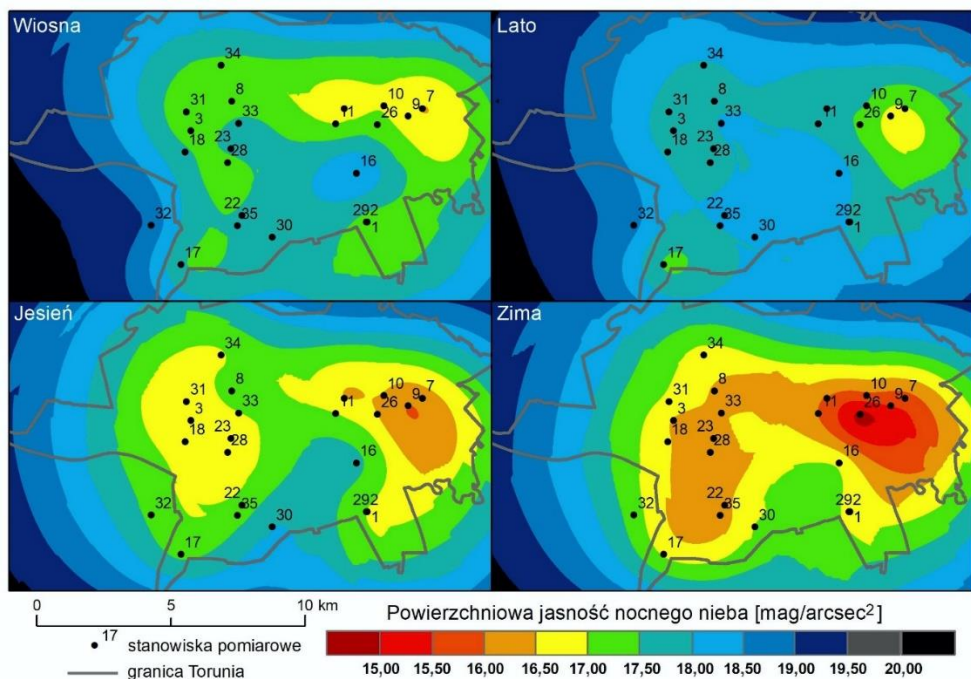
ID	Lokalizacja	Data rozpoczęcia (zakończenia)	Piętro	Cały rok [mag/arcsec <sup>2</sup> ]			Lato	Jesień	Zima	Wiosna
				średnia	min	max	średnia [mag/arcsec <sup>2</sup> ]			
1	ul. Włocławska 167	23.03.2021 (20.04.2021)	3	17,5	15,9	20,1				17,5
2	ul. Włocławska 167	23.03.2021 (20.04.2021)	3	17,6	15,5	19,9				17,3
3	ul. Lwowska 1	16.02.2021	3	16,9	14,1	20,0	17,7	16,4	16,3	17,3
7	ul. Szosa Lubicka 182	30.03.2022	3	16,3	14,1	17,6	17,0	16,3	15,7	16,5
8	Sz. Chełmińska 160	30.03.2022	3	17,2	14,0	19,5	17,9	17,3	16,4	17,0
9	ul. Witosa 7	12.07.2022	3	16,1	13,9	18,5	16,6	15,8	15,6	
10	ul. Niesiołowskiego 26	13.02.2022	1	16,8	14,2	18,9	17,6	16,6	16,1	17,0
11	ul. Kalinowa 17	02.04.2022	parter	16,9	14,2	19,8	17,9	17,1	16,0	17,0
12	ul. Rydygiera 19	30.03.2022	9	16,6	14,5	18,1	17,4	16,3	16,0	16,8
13	ul. Kwiatowa 33	03.01.2023	1	15,8	14,0	19,4			15,8	
14	ul. Dębowa 15	23.05.2022	parter	16,6	14,0	20,0	18,0	16,3	16,8	17,9
16	Działki Rudak	30.05.2022	parter	17,8	15,3	20,6	18,2	17,8	17,1	18,4
17	ul. Szubińska 38	05.06.2022	1	17,2	14,5	20,8	17,3	17,3	16,9	17,6
18	ul. Fałata 82	12.11.2021	2	17,0	14,4	20,8	17,9	16,8	16,6	17,6
22	ul. Drzymały 5	30.03.2022	4	17,2	14,7	20,3	18,2	17,2	16,5	17,6
23	ul. Matejki 55	11.08.2021	10	17,0	14,2	20,2	17,9	16,7	16,5	17,7
25	ul. Lwowska 1	16.02.2021 (12.09.2021)	3	17,1	14,2	20,8	17,2		16,5	16,7
26	ul. Konstytucji 3 Maja 13	13.01.2023	9	14,4	13,7	15,2			14,4	
27	ul. Łączna 40	12.01.2023	3	16,4	14,3	20,9			16,4	
28	ul. Matejki 16	02.04.2022	4	16,9	14,0	20,3	17,8	17,0	16,2	17,3
29	ul. Włocławska 167	18.05.2021	3	17,1	13,3	20,1	18,0	16,9	16,8	17,0
30	ul. Łączna 40	29.03.2022 (12.01.2023)	3	18,1	15,8	20,9	18,1	18,1	17,1	17,9
31	ul. Makuszyńskiego 2	15.01.2022	parter	17,1	13,8	20,0	17,9	16,6	17,0	17,2
32	ul. Dębowa 15	03.09.2021 (23.05.2022)	parter	17,5	14,3	20,8	18,7	17,4	17,3	18,8
33	ul. Końcowa 4	28.07.2021	4	17,1	14,0	20,8	18,1	17,0	16,5	17,7
34	ul. Kwiatowa 33	12.10.2021 (03.01.2023)	1	17,0	14,1	21,0	17,9	16,9	16,7	17,4
35	ul. Okólna 10	30.12.2023	1	16,2	14,1	20,2			16,1	

Objaśnienia:

- w kolumnie „ID” numery stanowisk są zgodne z przyjętą wewnętrzną numeracją urządzeń,
- brak wartości w wybranych wierszach oznacza, iż urządzenie nie pracowało w danym oknie czasowym,
- data w nawiasie w kolumnie „Data rozpoczęcia (zakończenia)” oznacza końcową datę działania urządzenia (z uwagi na jego wymianę lub stwierdzone niepoprawne działanie).



Ryc. 2. Rozkład przestrzenny średniej rocznej wartości powierzchniowej jasności nocnego nieba w Toruniu oraz wartości minimalnej i maksymalnej.



Ryc. 3. Rozkład przestrzenny średniej wartości powierzchniowej jasności nocnego nieba w Toruniu w podziale na astronomiczne pory roku.

Zgodnie z dotychczasowymi badaniami, jasność nocnego nieba jest większa podczas obecności różnego rodzaju „rozpraszaczy” w troposferze, takich jak pyły



zawieszono czy mgła. Znaczne zwiększenie rejestrowanych wartości pomiarowych występuje głównie w sezonie jesienno-zimowym. Dodatkowo, zanieczyszczenie światłem potęgowane jest także podczas występowania zachmurzenia, które na obszarze Polski występuje częściej w okresie zimowym. Wpływ tego elementu na pomiary jasności nieba dokumentują analizy opisane w kolejnej części pracy.

Porównując dwie przedstawione na rycinach 1 i 2 interpolacje z różnych okresów pomiarowych (2017–2018 vs. 2021–2022) i metod pozyskiwania danych (fabryczne SQM vs urządzenia własnej konstrukcji) widzimy duże podobieństwo w rozkładzie przestrzennym zjawiska na terenie miasta. Pokrywają się obszary o najjaśniejszym niebie, czyli najbardziej zanieczyszczonym oraz te o stosunkowo lepszej jakości nocnego nieba. Różnicę widać jedynie w północno-wschodniej części miasta, w której w czasie realizacji pierwszych pomiarów zostało źle dobrane stanowisko, ze względu na umiejscowienie zbyt blisko źródła intensywnego oświetlenia zewnętrznego. W konsekwencji element ten bardzo mocno zawyżał pomiar w jego otoczeniu. Wyniki uzyskane w ostatnich dwóch latach za pomocą autorskich urządzeń pomiarowych działających w sieci monitoringu są dokładniejsze, wzajemnie porównywalne oraz realizowane jednocześnie w identycznych interwałach czasowych, przez co nieobarczone błędami niejednoczesności pomiarów. Zdiagnozowane wady i niedoskonałości ręcznego procesu akwizycji danych realizowanych w latach 2017–2018 podczas pierwszych pionierskich w Toruniu badań nad zanieczyszczeniem światłem zostały dzięki temu ulepszone i zautomatyzowane.

### **Zależność jasności powierzchniowej nocnego nieba od warunków meteorologicznych**

Panujące w momencie rejestracji warunki meteorologiczne wpływają na poziom wartości rejestrowanych przez fotometry. Mając długą i ciągłą serię obserwacyjną można spróbować określić zależności między tym zmiennymi. Analizie poddano więc związek mierzonej wartości powierzchniowej jasności nocnego nieba z występującymi czynnikami atmosferycznymi. Do wyznaczenia korelacji liniowej wykorzystano: wysokość podstawy chmur podawanej w metrach nad powierzchnią gruntu, stopień zachmurzenia określany w oktanach (przy czym 0 oznacza niebo bezchmurne, natomiast 8 całkowicie zachmurzone, a wartość 9 podaje się, gdy nastąpiło zjawisko uniemożliwiające określenie stopnia zachmurzenia np. mgła) oraz widzialność podawana w skali od 0 do 9 (gdzie 0 oznacza widoczność najgorszą, a 9 doskonałą).

Dane meteorologiczne, będące podstawą analizy zostały zarejestrowane na Stacji Meteorologicznej IMGW Toruń-Wrzosy w okresie 2021–2022. Do końca

marca 2022 roku dane były pozyskiwane przez całą dobę co godzinę, jednak od kwietnia 2022 w nocy zapisywane były jedynie pomiary automatyczne. Zachmurzenie ogólne określane jest manualnie, dlatego od kwietnia 2022 nie ma dostępnych nocnych pomiarów tego elementu. Dodatkowo, sezon letni charakteryzuje się niewystępowaniem nocy astronomicznej, dlatego do porównania danych uwzględniono jedynie pomiary zrealizowane o pełnej godzinie między 22:00-01:00 UTC, a w czasie przesilenia letniego czas ten zawężono dodatkowo z powodu zauważalnego wpływu światła słonecznego do godzin pomiędzy 23:00 a 00:00 UTC.

Potrzeba uwzględnienia warunków meteorologicznych w analizie pomiarów jasności nocnego nieba wynika z dużej liczby dni pochmurnych występujących nad Toruniem. Według danych Stacji Meteorologicznej IMGW Toruń-Wrzosy (Tabela 2) w latach 2019–2022, aż 30% nocy było całkowicie zachmurzonych, 45% częściowo pochmurnych w różnym stopniu, a około 25% bezchmurnych.

Tabela 2. Częstość występowania (%) poszczególnych stopni zachmurzenia nieba w podziale na astronomiczne pory roku w okresie od stycznia 2019 do kwietnia 2022 roku.

Oktany	Cały rok	Wiosna	Lato	Jesień	Zima
0	22%	28%	24%	15%	22%
1	6%	10%	8%	3%	2%
2	6%	7%	9%	4%	4%
3	4%	5%	6%	4%	3%
4	3%	4%	4%	2%	2%
5	5%	6%	7%	4%	4%
6	5%	7%	6%	4%	4%
7	18%	17%	19%	17%	18%
8	30%	16%	17%	44%	40%
9	1%	0%	0%	3%	1%

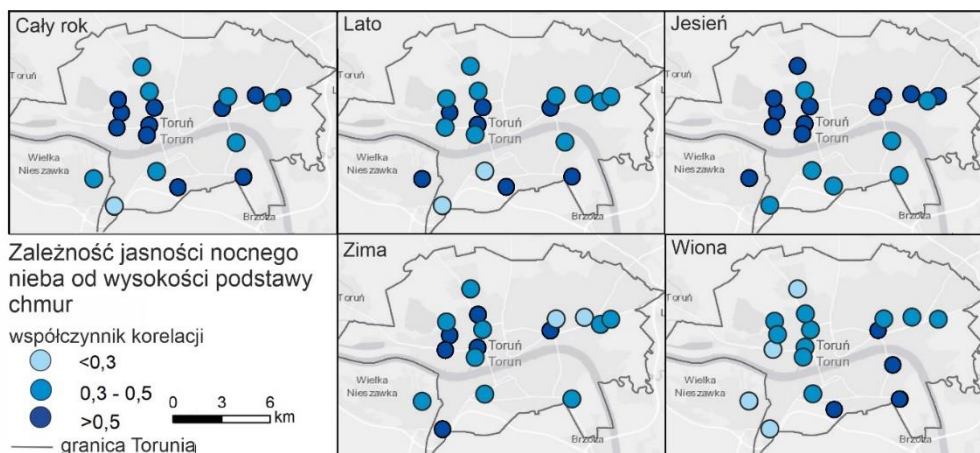
Korelację liniową między wybranymi czynnikami a powierzchniową jasnością nocnego nieba przedstawia zawartość Tabeli 3. Pokazane są w niej wyniki korelacji z każdego urządzenia, odniesione zarówno do całego okresu analizy, jak i do poszczególnych astronomicznych pór roku.

Zmniejszona liczba porównań dotycząca parametru zachmurzenia ogólnego wynika ze wspomnianej wcześniej niedostępności tych danych, począwszy od kwietnia 2022 roku. Jednak już przy takiej liczbie analiz można zauważyć dużą korelację między tym parametrem, a wykonanymi pomiarami. Wartość korelacji dla prawie wszystkich punktów w każdym wydzielonym sezonie oraz w ujęciu rocznym przewyższa 0,5.

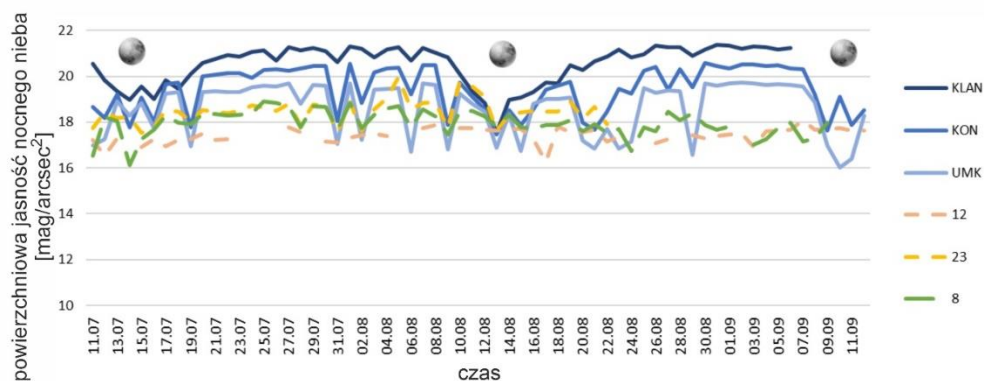
Tabela 3. Korelacja całkowita oraz obliczona dla każdej astronomicznej pory roku pomiędzy powierzchnią jasnością nocnego nieba a wybranymi warunkami meteorologicznymi, odniesiona do punktów monitoringu. Wartości bezwzględne powyżej 0,5 zostały pogrubione.

ID	Cały rok			Lato			Jesień			Zima			Wiosna		
	Wysokość podstawy chmur	Zachmurzenie ogólne	Widzialność	Wysokość podstawy chmur	Zachmurzenie ogólne	Widzialność	Wysokość podstawy chmur	Zachmurzenie ogólne	Widzialność	Wysokość podstawy chmur	Zachmurzenie ogólne	Widzialność	Wysokość podstawy chmur	Zachmurzenie ogólne	Widzialność
1	<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,2										<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,2
2	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,2										<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,2
3	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,4	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,2	<b>0,7</b>	<b>-0,6</b>	0,2	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,3	<b>0,5</b>	<b>-0,7</b>	0,2
7	<b>0,5</b>		0,2	0,4		0,1	<b>0,5</b>		0,0	0,4		<b>0,6</b>	0,4		0,0
8	0,4	0,0	0,2	0,4		0,3	0,4		-0,2	<b>0,5</b>		-0,2	0,3	0,0	0,2
9	<b>0,5</b>		0,1	0,4		0,1	0,4		0,0	0,4		0,3			
10	<b>0,5</b>	-0,3	0,1	0,4		0,1	<b>0,7</b>		0,0	0,2	-0,3	0,1	0,4		0,0
11	<b>0,6</b>		0,0	<b>0,7</b>		-0,1	<b>0,6</b>		-0,1	<b>1,0</b>		-0,1	<b>0,6</b>		0,1
12	<b>0,5</b>		0,2	0,4		0,2	<b>0,5</b>		-0,1	0,2		0,3	0,4		0,0
14	<b>0,7</b>		0,3	<b>0,5</b>		0,4	<b>0,7</b>		0,0	<b>0,6</b>		<b>0,7</b>	0,4		0,2
16	0,4		-0,1	0,4		0,0	0,4		-0,3				<b>0,7</b>		-0,2
17	0,2		-0,2	0,2		0,0	0,4		-0,2	<b>0,7</b>		0,4	0,4		0,0
18	<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,2	0,4		0,2	<b>0,6</b>	-0,4	0,0	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,4	0,2	-0,4	0,1
22	<b>0,5</b>	0,0	0,3	0,2		<b>0,5</b>	<b>0,5</b>		-0,1	0,4		<b>0,5</b>	0,4	0,0	0,2
23	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,3	<b>0,5</b>	<b>-0,6</b>	0,2	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,0	<b>0,5</b>	<b>-0,6</b>	0,2	0,4	-0,4	0,0
25	<b>0,5</b>	<b>-0,6</b>	0,2	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,0				0,4	-0,4	0,2	<b>0,6</b>	<b>-0,7</b>	0,2
28	<b>0,6</b>		0,4	0,3		0,2	<b>0,6</b>		-0,1	<b>0,5</b>		<b>0,7</b>	0,4		0,1
29	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,3	<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,1	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,1	0,3	-0,3	0,3	0,4	<b>-0,5</b>	0,1
30	<b>0,5</b>		0,0	<b>0,6</b>		0,0	0,4		-0,1				<b>0,6</b>		0,1
31	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,3	0,3		0,3	<b>0,7</b>		-0,2	0,4	<b>-0,5</b>	0,1	0,3	<b>-0,6</b>	0,2
32	<b>0,5</b>	-0,4	0,1	<b>0,6</b>	<b>-0,7</b>	0,1	<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,1	0,4	-0,4	0,0	-0,2	<b>-0,6</b>	-0,3
33	<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,3	<b>0,5</b>	<b>-0,6</b>	0,2	<b>0,6</b>	<b>-0,6</b>	0,0	0,4	<b>-0,5</b>	0,2	0,4	-0,4	0,1
34	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,2	0,4		0,1	<b>0,6</b>	<b>-0,5</b>	0,0	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	0,3	0,3	-0,1	0,0

Wyniki analizy korelacji pomiędzy wysokością podstawy chmur a wartościami jasności nocnego nieba zarejestrowanymi przez urządzenia pomiarowe, przeprowadzonej zarówno w skali całego roku jak i poszczególnych sezonów, zostały także przedstawione graficznie w ujęciu przestrzennym. Rycina 4, wykorzystująca metodę kartogramu punktowego, pokazuje wartość korelacji odniesioną do położenia punktu pomiarowego na mapie Torunia.



Ryc. 4. Rozkład przestrzenny korelacji pomiędzy wysokością podstawy chmur a mierzoną powierzchniową jasnością nocnego nieba w Toruniu.



Ryc. 5. Zestawienie pomiarów zanieczyszczenia światłem nocnego nieba, zrealizowanych na stanowiskach leżących poza obszarem zabudowanym (KLAN i KON) oraz zlokalizowanymi w różnych częściach Torunia (UMK i stanowiska pomiarowe nr 12, 23 oraz 8). Symbolem księżyca oznaczono występowanie pełni.

Analizując przedstawione na rycinie 5 wyniki można zauważyć, iż najwyższa korelacja odnosi się do miejsc o znacznym zanieczyszczeniu światłem emitowanym przez dużą liczbę lamp ulicznych, których światło odbija się od zalegających chmur i wtórnie zawięzowane parametry. Korelacja między tymi zmiennymi zmienia się na przestrzeni roku. Większość punktów monitoringu w każdym sezonie uzyskała wysoką korelację między pomiarami a wysokością podstawy chmur oraz zachmurzeniem ogólnym. Takiej zależności nie obserwujemy jednak w odniesieniu do widzialności. Najczęstsze wartości korelacji powyżej 0,5 stwierdzano jesienią, następnie latem i zimą, zaś najrzadziej wykazywano taką korelację wiosną. Na zaniżony wynik korelacji w tym okresie

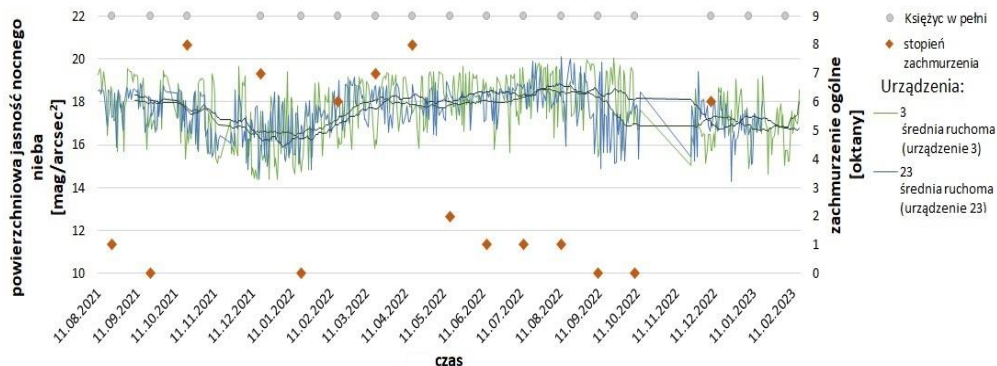
mogą mieć wpływ dodatkowe czynniki, takie jak liczne „rozpraszacze” światła w postaci pyłów zawieszonych czy drobinek wody w atmosferze, ale także skracająca się długość nocy. W procesie analizy danych, wybór godzin rejestracji między 23:00 a 00:00 podczas przesilenia letniego, może mieć wpływ na uzyskane wyniki oraz obliczaną korelację pomiędzy mierzonymi wartościami a czynnikami.

### **Odniesienie wyników pomiarów zanieczyszczenia światłem z obszaru zurbanizowanego do pomiarów referencyjnych**

Dodatkowym elementem analizy było porównanie wartości zanieczyszczenia nocnego nieba zarejestrowanych na terenie zurbanizowanym, jakim jest Toruń, z miejscami położonymi w oddaleniu od większych skupisk ludzkich. W tym celu konieczne było wykorzystanie fabrycznych fotometrów SQM, ponieważ ze względu na położenie poza granicami Torunia nie można było korzystać z sygnału sieci LoRaWAN. Łącznie trzy takie urządzenia dodatkowo wzbogaciły prowadzone obserwacje, i zostały rozmieszczone w malejącym gradiencie oddziaływania człowieka. Jedno z urządzeń zamontowane zostało na Stacji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Koniczynie, położonej 10 km w linii prostej na północny-wschód od granic Torunia, natomiast drugie w leśnej osadzie Klaniny w Borach Tucholskich (około 100 km w linii prostej na północ od Torunia), z dala od wpływu jakichkolwiek źródeł światła. Trzeci fotometr SQM znajduje się na tarasie obserwacyjnym Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK i był już wcześniej wykorzystywany przy testowaniu wszystkich autorskich urządzeń pomiarowych na etapie demonstratora technologii. Zestawienie uzyskanych wyników z tych trzech lokalizacji pozwoliło na ich wzajemne porównanie w kontekście zwiększającej się odległości od dużego miasta i malejącego gradientu oddziaływania zurbanizowanej tkanki miejskiej. Dodatkowo do porównania dodano wyniki uzyskane przez trzy urządzenia działające w sieci monitoringu miejskiego, znajdującego się w miejscach o stwierdzonym znacznym zanieczyszczeniu światłem (ryc. 5).

Analizując wykres pokazany na rycinie 5 można zauważyć znaczącą różnicę między pomiarami uzyskanymi w tych wybranych lokalizacjach. Dane zarejestrowane w Borach Tucholskich (KLAN) wykazują najwyższe wartości, co przekłada się na najmniejsze zanieczyszczenie światłem na tym obszarze, natomiast pomiary zrealizowane na stacji w Koniczynie (KON) wykazują już wpływ oddziaływania miejskiej wyspy świetlnej Torunia. Na wykresie tym widać także udowodniony wcześniej wpływ nocy pochmurnych na poziom mierzonych wartości. Zestawiając te kilkumiesięczne pomiary można zauważyć również wpływ pełni księżyca na rejestrowaną wartość. Widać to bardzo dobrze na przykładzie danych pozyskanych w miejscowości Klaniny. Tego efektu nie

obserwuje się jednak przy zestawieniu faz księżyca z pomiarami realizowanymi na terenach miejskich. Oznacza to, iż znacząco większy wpływ na pomierzone wartości na terenie zurbanizowanym ma obecność infrastruktury ulicznej niż naturalne światło księżyca, dominujące na terenach niezamieszkałych.



Ryc. 6. Zestawienie pomiarów zanieczyszczenia światłem nocnego nieba zrealizowanych na wybranych stanowiskach monitoringu w Toruniu (nr 3 i 23) w odniesieniu do fazy księżyca oraz stopnia zachmurzenia. Dodatkowo przedstawiono średnią ruchomą, wyliczoną dla 30 okresów pomiarowych z każdego urzędnia.

Podobną zależność przedstawia rycina 6, na której przedstawiono wyniki wielomiesięcznych pomiarów na dwóch wybranych stanowiskach pomiarowych (urządzenie nr 3 znajdujące się na terenie UMK oraz nr 23 położone bliżej centrum miasta). Na wykres nałożono średnią ruchomą, dzięki której bardziej widoczna staje się wspomniana wcześniej sezonowa zmienność pomiarów. Dodatkowo do wykresu dodany został czas występowania pełni księżyca (w tym przypadku oznaczony szarymi punktami u góry wykresu) oraz występujące w tym czasie zachmurzenie, przedstawione w skali oktanowej. Analizując przedstawione wartości można zauważyć zwiększenie mierzonej jasności nocnego nieba w czasie występowania pełni księżyca. Nie jest to jednak bezwzględna reguła, a pewna prawidłowość. Większy efekt zmienności powierzchniowej jasności nocnego nieba widoczny jest podczas występowania pełnego zachmurzenia. Silniejszą zależność otrzymanych wyników wykazuje urządzenie nr 3, znajdujące się dalej od centrum miasta, co potwierdza wcześniejsze wyniki analiz zaprezentowane na rycinie 5. Przytoczone dane udowadniają, iż konieczne jest dalsze rozpatrywanie wpływu różnych czynników meteorologicznych na zwiększenie rejestrowanych wartości powierzchniowej jasności nocnego nieba, tak aby w przyszłości możliwe było jeszcze lepsze poznanie tego zjawiska oraz dokładniejsze opracowanie modelu zanieczyszczenia światłem uwzględniającego występowanie różnych warunków atmosferycznych.

## Podsumowanie i wnioski

Zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba staje się coraz bardziej rozumianym i obserwowanym nie tylko przez specjalistów zjawiskiem, degradującym środowisko naszego życia i funkcjonowania. W celu jego lepszego poznania i zrozumienia prowadzone są interdyscyplinarne badania określające zarówno zasięg, skalę i siłę, jego naturę, jak i oddziaływanie na poszczególne organizmy żywe. O wzroście zainteresowania tematyką świadczy rosnąca w ostatnich latach liczba opublikowanych artykułów naukowych i wystąpień konferencyjnych (Levin i in. 2020; Mander i in. 2023). Niniejszy rozdział dokumentuje występowanie tego zjawiska na obszarze Torunia, przedstawia jego rozkład przestrzenny oraz wielkość występowania, a także sezonową zmienność i zależność od wybranych warunków atmosferycznych. Przedstawione wyniki prezentują złożoność procesu pomiarowego oraz opisują przeprowadzoną w sposób kompleksowy analizę zanieczyszczenia światłem, wykonaną na obszarze miejskim. W procesie tym oszacowano także rolę i wpływ czynników zewnętrznych na rejestrację wartości pomiarowych, skutkujących zwiększoną emisją sztucznego światła w nocy. Okres zimowy wykazuje się największym zanieczyszczeniem światłem wzmacnianym dodatkowo przez występowanie w troposferze licznych rozpraszaczy pochodzenia antropogenicznego, natomiast latem efekt ten jest zdecydowanie mniejszy. Przedstawienie rocznej korelacji danych z typowymi elementami meteorologicznymi określa ich wpływ na zwiększanie się powierzchniowej jasności nocnego nieba na terenach miejskich. Podczas realizacji w ciągły sposób dwuletnich badań w Toruniu, nie zauważono znacznego wpływu księżyca podczas pełni na wartości jasności nocnego nieba. Efekt ten jest zdominowany obecnością głównie światel ulicznych, neonów reklamowych oraz iluminacji obiektów architektonicznych. Jest to odwrotna zależność, niż obserwowana na obszarach oddalonych od źródeł miejskiego światła, w których księżyc podczas pełni znacząco wpływa na pomiary jasności nocnego nieba. Zaprojektowana i eksploatowana w Toruniu na potrzeby projektu automatyczna sieć monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba okazała się w pełni skuteczna i niezbędna dla ciągłej akwizycji danych służących przede wszystkim lepszemu poznaniu zjawiska i jego dokładnego przestrzennego kartowania. Została także operacyjnie sprawdzona poprawność działania zaprojektowanych od podstaw niskobudżetowych urządzeń pomiarowych oraz wyboru lokalizacji rejestratorów do objęcia pełnej i kompleksowej akwizycji na terenie miejskim o takiej powierzchniowej wielkości i typie zabudowy. Opracowana metoda zbierania danych na obszarze miejskim, która wykorzystuje technologie *Przemysłu 4.0* oraz inteligentne sieci przesyłowe wydaje się być dobrym uzupełnieniem stosowanych metod monitoringu nie tylko samego

zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba. Wydaje się także dobrym kierunkiem rozwoju, służącym rejestracji także innych parametrów środowiska. Uzyskane wyniki stanowią dobrą podstawę do planowania dalszych analiz oraz badań zanieczyszczenia światłem na terenach zurbanizowanych. Toruń jest prawdopodobnie pierwszym miastem na świecie, dla którego przeprowadzono ukierunkowane badania zanieczyszczenia światłem nocnego nieba w tak gęstej punktowo sieci pomiarowej, które posiada tak długą serię jednoczesnych i porównywalnych obserwacji naziemnych.

Kolejnym etapem prac powinna być analiza zależności jasności nocnego nieba od innych elementów mogących wpływać na rejestrowane wartości. Przede wszystkim należy powiązać uzyskiwane wyniki z jednoczesnym określeniem występowania pyłów różnej wielkości, mgły, zachmurzenia, pokrywy śnieżnej oraz wykorzystywanych rozwiązań technologicznych dotyczących oświetlenia zewnętrznego w zakresie barwy światła, temperatury i czasu działania. Realizacja tego wymaga jednak zbudowania kolejnej generacji urządzeń pomiarowych, co dzisiaj wydaje się bardzo realne i możliwe do wykonania w najbliższym czasie.

## Literatura

- Adams C.A., Blumenthal A., Fernández-Juricic E., 2019. Effect of anthropogenic light on bird movement, habitat selection, and distribution: A systematic map protocol. *Environmental Evidence* 8(Suppl. 1): 13.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2.
- Garcia-Saenz A., Sanchez de Miguel A., Espinosa A., Crespo A., Aragonés N., Llorca J., Amiano P., Martín V., Guevara M., Capelo R., Tardón A., Peiró R., Jiménez-Moleón J., Roca Barcelo A., Perez-Gomez B., Dierssen-Sotos T., Fernández T., Moreno-Iribas C., Moreno V., Kogevinas M., 2018. Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain. *Environmental Health Perspectives* 126.
- International Dark-Sky Association, 2022. *The International Dark Sky Places conservation program recognizes and promotes excellent stewardship of the night sky.* <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/> (dostęp: 29.12.2022).
- Jechow A., Hölker F., 2019. How dark is a river? Artificial light at night in aquatic systems and the need for comprehensive night-time light measurements. *WIREs Water* 6(6): e1388.
- Jechow A., Kyba C.C.M., Kolláth Z., Lerner A., Hänel A., Shashar N., Hölker F., 2017a. Measuring light pollution with fisheye lens imagery from a moving boat, a proof of concept. *International Journal of Sustainable Lighting* 36(1): 15–255.
- Karpińska D., Kunz M., 2022. Device for automatic measurement of light pollution of the night sky. *Scientific Reports* 12: 16476.



- Karpińska D., Kunz M., 2020. Analysis of light pollution of the night sky in Toruń (Poland). *Civil and Environmental Engineering Reports* 30(4): 155–172.
- Karpińska D., Kunz M., 2020a. Ochrona nocnego nieba – wyzwanie dla Rezerwatu Biosfery Bory Tucholskie. [w:] Kunz M. (red.), *Rola i funkcjonowanie parków krajobrazowych w rezerwatach biosfery*. Wyd. Naukowe UMK, Toruń: 329–346.
- Karpińska D., Kunz M., 2019. Light pollution in the night sky of Toruń in the summer season. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 17: 91–100.
- Kocifaj M., Bará S., 2020. Nighttime monitoring of the aerosol content of the lower atmosphere by differential photometry of the anthropogenic skyglow. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 500: 47–51.
- Kołomański S., 2015. Zanieczyszczenie światłem i ciemność. [w:] Wiśniewska M.R., Tomasik K. (red.), *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, Wyd. UW, Warszawa: 29–46.
- Lacoeuilhe A., Machon N., Julien J.F., 2014. The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. *PLoS One* 9(10): e103042.
- 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., Wang Z., Shrestha R.M., Elvidge C.D., 2020. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment* 237: 111443.
- Linares H., Masana E., Ribas S.J., Aubé M., Simoneau A., Bará S., 2020. Night sky brightness simulation over Montsec protected area. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 249.
- Longcore T., Rich C., DelBusso L., 2017. Artificial Night Lighting and Protected Lands. *Natural Resource Report NPS/NRSS/NSNS/NRR-2017/1493*.
- Light pollution reduction measures in Europe, 2022*. Working paper for international workshop “Light Pollution 2022”, during the Czech Presidency of the Council of the European Union, Ministry of the Environment of the Czech Republic, 60 p.
- Macgregor C.J., Evans D.M., Fox R., 2017. The dark side of street lighting: Impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Global Change Biology* 23(2): 697–707.
- Mander S., Alam F., Lovreglio R., Ooi M., 2023. How to measure light pollution – a systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*.
- Ribas S., Torra J., Figueras F., Paricio S., Canal-Domingo R., 2016. How clouds are amplifying (or not) the effects of ALAN. *International Journal of Sustainable Lighting* 18.
- Szlachetko K. (red.), 2022. *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego*. Instytut Metropolitalny, Gdańsk, 48 s.
- Ściężor T., 2020. The impact of clouds on the brightness of the night sky. *Journal of Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer* 247.
- Ściężor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., 2010. Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej. *Inżynieria środowiska* 388. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków.

## **Streszczenie**

Zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba nad obszarami zurbanizowanymi i w ich bezpośrednim sąsiedztwie stało się powszechnym zjawiskiem towarzyszącym człowiekowi oraz istotnym problemem współczesnego miejskiego krajobrazu. Już nie tylko naukowcy czy ekolodzy, ale i coraz częściej zwykli mieszkańcy dostrzegają spadek jakości nocnego nieboskłonu oraz odczuwają konsekwencje zdrowotne tego systematycznie pogłębiającego się procesu. W celu obserwacji naturalnie rozgwieżdżonego nieba konieczny staje się już wyjazd do miejsc oddalonych, nie tylko od wielkich aglomeracji, ale także od mniejszych skupisk ludzkich. Aby nastąpiła poprawa stanu zanieczyszczenia nocnego nieba niezbędny jest monitoring zjawiska, ukierunkowana edukacja oraz podejmowanie systemowych przeciwdziałań ograniczających w czasie i przestrzeni jego negatywne skutki. Badania nad problematyką zanieczyszczenia światłem prowadzi na świecie kilka interdyscyplinarnych grup badawczych oraz organizacji pozarządowych. W Toruniu pierwsze pomiary tego zjawiska rozpoczęły się od 2017 roku z wykorzystaniem ręcznych urządzeń SQM, a od 2020 rozbudowana jest bezprzewodowa, automatyczna sieć monitorująca stan miejskiego nocnego nieba. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy danych pomiarowych zarejestrowanych podczas dwuletniej operacyjnej pracy sieci monitoringu. Przeprowadzone pomiary pozwoliły nie tylko na analizę zmienności sezonowej zjawiska, ale także na przeprowadzenie wybranych analiz przestrzennych w granicach miasta. Uzyskane wyniki odniesiono do wyników pomiarów otrzymanych poza skupiskami ludzkimi, co pozwoliło na określenie zróżnicowania jasności nieba w gradiencie malejącego oddziaływania człowieka.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, nocne niebo, sieć monitoringu, krajobraz miejski, Toruń.

## **Spatial and temporal analysis of artificial light pollution of the city night sky – a case study from Toruń**

### **Summary**

Artificial light pollution of the night sky over urban areas and in their immediate vicinity has become a common anthropogenic phenomenon and a major problem of the modern urban landscape. It is no longer only scientists or environmentalists, but increasingly ordinary citizens too, who perceive a decline in the quality of the night sky and suffer the health consequences of this systematically aggravating process. In order to observe the naturally starry sky, it is now necessary to travel to places far away, not only from large conurbations, but also from smaller human settlements. In order for there to be an improvement in the level of night sky pollution, it is necessary to monitor the phenomenon, provide targeted education and take systemic countermeasures to reduce its negative effects in time and space. Several interdisciplinary research groups and non-governmental organisations around the world conduct research on light pollution. In Toruń, the first measurements of this phenomenon were carried out in 2017 using handheld SQM devices, and a wireless automatic network monitoring the state of the city's night sky has been developed since 2020. This paper presents the results of the analysis of measurement data recorded during the two-year operational operation of the monitoring network. The conducted measurements provided data to analyse the seasonal variability of the phenomenon, as well as to perform selected spatial analyses within the city limits. The results obtained were related to the results of measurements made outside human settlements, which made it possible to determine the variation of sky brightness in a gradient of decreasing human impact.

**Key words:** light pollution, night sky, monitoring network, urban landscape, Toruń.

### **Dane kontaktowe autorów:**

**Dominika Karpińska**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: karpinskadominika@doktorant.umk.pl

**Mieczysław Kunz**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: met@umk.pl

**Hubert Horynek**

## **Krzywa wrażeń Wejcherta jako narzędzie identyfikacji zanieczyszczenia światłem w przestrzeni miejskiej**

### **Wprowadzenie**

Zapoznając się z literaturą dotyczącą tematu zanieczyszczenia światłem, odnosi się wrażenie, że najlepiej opisane jego aspekty to z jednej strony sztuczne rozświetlenie nocnego nieba, a z drugiej wpływ jego cech spektralnych na funkcjonowanie człowieka i innych organizmów żywych. Zdecydowanie mniej jest opracowań, dotyczących sposobów prowadzenia pomiarów i obserwacji zjawiska zanieczyszczenia światłem w przestrzeni miejskiej.

Będące przyczyną zanieczyszczenia światłem nieodpowiednio dobrane cechy przestrzenne i ilościowe źródeł oświetlenia, w przestrzeni miejskiej przyjmują formę chaosu świetlnego. Wpływa on szczególnie negatywnie na odbiór krajobrazu miejskiego. Do jego powstawania przyczyniać się mogą zarówno instalacje oświetleniowe spełniające zarówno funkcje użytkowe, jak i dekoracyjne.

W niniejszym rozdziale opisano wyniki sprawdzenia, czy jedna ze znanych metod waloryzacji krajobrazu – krzywa wrażeń Wejcherta – znajdzie zastosowanie w analizach chaosu świetlnego w przestrzeni miejskiej.

### **Chaos świetlny**

Zanieczyszczenie światłem jest kolejnym, po zanieczyszczeniu powietrza, wód i gleb, antropogenicznym zanieczyszczeniem biosfery. Kolejnym w sensie momentu, w którym zaczęliśmy zdawać sobie z niego sprawę. Badania wpływu oświetlenia zewnętrznego na środowisko prowadzono już w początkach XX wieku (Squires i Hanson 1918). W 1973 roku czasopismo *Science* opublikowało artykuł, traktujący o wpływie oświetlenia zewnętrznego na obserwacje astronomiczne,

nazywając to zjawisko wprost zanieczyszczeniem światłem (Riegel 1973). Od tamtej pory zanieczyszczenie światłem przyjmuje się za fakt. W kolejnych latach przybywało publikacji dotyczących wpływu oświetlenia zewnętrznego, nie tylko na obserwacje astronomiczne (Garstang 1986), ale również na zdrowie i zachowanie ludzi (Brainard i in. 1997) i innych organizmów żywych (Rich i Longcore 2004).

Antropogeniczność zanieczyszczenia światłem polega na tym, że nadmiarowe światło emitowane jest przez źródła tzw. oświetlenia zewnętrznego, tj. instalacje oświetleniowe stworzone przez człowieka. Przyczyną zanieczyszczenia światłem są nieodpowiednio dobrane cechy przestrzenne, ilościowe lub spektralne źródeł oświetlenia zewnętrznego:

- zanieczyszczenie światłem zaburza regularne następowanie po sobie dnia i nocy, w zmieniających się w ciągu roku proporcjach ich trwania,
- zanieczyszczenie światłem pojawia się nie tylko w trójwymiarowej przestrzeni fizycznej, jego oddziaływanie jest szersze, bardzo ważną rolę odgrywa charakterystyka spektralna zastosowanego źródła światła sztucznego.

W literaturze podawane są różne przejawy zanieczyszczenia światłem. Kołomański (2013) wymienia następujące:

- ucieczka światła do obszarów, które nie powinny być oświetlane lub nie są celem danego oświetlenia,
- emisja światła w ilości większej, niż jest potrzebne,
- olśniewanie (dyskomfort lub utrudnianie korzystania z oświetlenia) użytkowników oświetlenia zewnętrznego (pieszych, kierowców, itd.) przez źródła światła źle osłonięte, źle skierowane lub zbyt jasne,
- chaos świetlny, powodowany przez niewłaściwie zaprojektowane oświetlenie, prowadzący do dezorientacji lub odwracający uwagę od przeszkód,
- sztuczne rozświetlenie nocnego nieba.

Zgodnie z powyższym, światło mogące być narzędziem porządkującym przestrzeń po zmroku, przyczynia się do powstawania zjawiska chaosu świetlnego. W niniejszym rozdziale zaproponowano metodę identyfikacji i oceny rozmiarów występowania chaosu świetlnego w przestrzeni miejskiej.

## **Analizy widokowe**

Wizualna dostępność krajobrazu miasta jest związana z umiejscowieniem obserwatora w przestrzeni. Krajobraz miasta poznajemy przez powiązane ze sobą wnętrza urbanistyczne, którymi są ulice i place miejskie – to w nich przebywa i porusza się obserwator. Ubiegłowieczni teoretycy urbanistyki

zauważyli, że krajobraz miejski odczytywać można jako ciąg widoków (Szmidt 1981; Wejchert 2010; Cullen 2011). Zwracano uwagę na zmienność przestrzeni w czasie w tym sensie, że w trakcie jednego spaceru pewne fragmenty miasta, początkowo niewidoczne, stopniowo stają się doświadczeniem obserwatora (Szmidt 1981). W miarę przemieszczania się obserwatora wewnątrz przestrzeni miejskiej, to co początkowo było zaledwie tłem, albo pozostającym gdzieś w oddali mało istotnym obiektem, stopniowo zyskuje na znaczeniu, odgrywając coraz to większą rolę w obserwowanym widoku (Cullen 2011). Obserwator w miarę upływu czasu w odmienny sposób poszczególne widoki odbiera, klasyfikuje i porządkuje (Wejchert 2010).

Wejchert (2010) operował kategorią otwarcia widokowego dostępnego obserwatorowi z poziomu wnętrza urbanistycznego. Zdefiniował on pojęcie wnętrza urbanistycznego i tego rodzaju wnętrza właśnie, ich krajobraz i ich wzajemne relacje, były przedmiotem jego badań.

W roli podstawowych elementów kompozycji urbanistycznej Wejchert widział: podłogę urbanistyczną, ściany i sufit urbanistyczny. Kluczową rolę w definiowaniu wnętrza urbanistycznego odgrywają ściany. To one wydzielają wnętrza w sposób najbardziej czytelny.

Wnętrzem urbanistycznym może być zarówno ulica jak i plac miejski. W odniesieniu do tego sam autor pojęcia zauważył, że „struktura miasta składa się w zasadzie z szeregu różnego typu wnętrz urbanistycznych” (Wejchert 2010). Stosując pewne uproszczenie możemy przyjąć, że przemieszczający się po mieście pieszo obserwator, cały czas pozostaje w jakimś wnętrzu.

Elementy składowe przestrzeni miejskiej, jakimi są wnętrza urbanistyczne, muszą być zatem ze sobą w pewien oczywisty sposób połączone. Takie połączenie dwóch fragmentów przestrzeni miejskiej mających formę wnętrz urbanistycznych, nazywa Wejchert „sprzężeniem” (Wejchert 2010). Kolejne sprzężenia pojedynczych wnętrz tworzą coraz większe ich układy.

Ciągłość występowania wnętrz urbanistycznych w przestrzeni miejskiej sprawia, że ich jakość wpływa na jakość tej przestrzeni. Innymi słowy, im wyższej jakości wnętrza urbanistyczne, im lepiej skomponowane, tym lepiej dla przestrzeni miejskiej jako takiej. Nie bez znaczenia pozostają również sposoby łączenia, a w zasadzie przenikania się, poszczególnych wnętrz, jakimi są między innymi otwarcia widokowe. Wejchert zauważa, że sposób odbioru wnętrza przez obserwatora, a w zasadzie jego natężenie, zależne jest od poziomu złożoności widoków obserwowanych z wnętrza urbanistycznego.

Mając świadomość wpływu jakości widoków obserwowanych z poziomu wnętrza urbanistycznego na poziom atrakcyjności całej przestrzeni miejskiej, Wejchert zaproponował narzędzie oceny kompozycji urbanistycznej. Narzędziem tym jest tzw. „krzywa wrażeń”, czyli wykres najczęściej w 10-stopniowej skali, który ilustruje zmianę natężenia wrażeń u obserwatora przestrzeni miejskiej. Jak zauważył sam twórca tej metody oceny kompozycji urbanistycznej, wrażenia wywoływane przez obserwacje przestrzeni miejskiej będą „mniejsze, słabsze w układach monotonnych, bezbarwnych, większe zaś, mocniejsze, w przestrzeniach bogatych, złożonych, o czytelnej formie całości” (Wejchert 2010).

Narzędzie zaproponowane przez Wejcherta znalazło szereg zastosowań. Wykorzystywano je w: badaniach nad percepcją przestrzeni miejskiej (Bazan-Krzywoszańska i in. 2015), badaniach dotyczących oceny atrakcyjności wizualnej krajobrazu (Malinowska 2010; Młynarczyk i in. 2015; Hawrot 2016; Janiszek i Majorek 2017; Pisarek i Gargała-Polar 2019), delimitacji ze względu na typy krajobrazu (Rostek i Senetra 2012), badaniach z zakresu analiz rynku nieruchomości (Senetra 2010) i przedprojektowych analiz przestrzennych (Kupidura i in. 2011; Jaszczuk 2020).

Najbliżej tematyki opracowanego rozdziału w kwestii wykorzystania krzywej wrażeń Wejcherta, tj. analizach oświetlenia przestrzeni miejskiej, była Pożarowszczyk-Bieniak (2021) w swojej pracy doktorskiej. W dysertacji tej korzystano z krzywej wrażeń w celu dokonania wstępnej selekcji widoków do dalszych analiz związanych z tematem pracy (Pożarowszczyk-Bieniak 2021).

## **Metoda badawcza**

Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto założenie, że krzywa wrażeń może pomóc w identyfikacji przypadków chaosu świetlnego w przestrzeni miejskiej.

Wykresy krzywej wrażeń sporządzono dla ciągów wybranych wewnątrz urbanistycznych znajdujących się na obszarze szeroko pojętego centrum Warszawy, objętego ochroną konserwatorską. Wyboru ciągów widokowych do badań dokonano analizując zapisy *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Stołecznego Warszawy* (dalej SUIKZP). W oparciu o zapisy SUIKZP rozpoznano strefy ochrony konserwatorskiej w przestrzeni miejskiej Warszawy, a wśród nich m.in.:

- historyczny zespół miasta z Traktem Królewskim i Wilanowem (pomnik historii),
- układy urbanistyczne, zespoły budowlane:
  - wielkoprzestrzenne założenia urbanistyczne,
  - założenia urbanistyczne ulic i placów.

Po wstępnej analizie przestrzeni objętych różnymi formami ochrony zgodnie z zapisami SUiKZP (2021), wyznaczono ciągi sprzężonych ze sobą wnętrz urbanistycznych (które biorąc pod uwagę wykorzystywaną metodologię dalej nazywa się również „trasą spaceru”) związanych z: Traktem Królewskim, wielkoprzestrzennymi założeniami urbanistycznymi i z zespołem siedmiu placów Warszawy (ryc. 1).



Ryc. 1. Lokalizacja elementów Traktu Królewskiego, wielkoprzestrzennych założeń urbanistycznych i siedmiu placów Warszawy (opracowanie własne na podstawie BDOT).

Trakt Królewski zaczyna się na Placu Zamkowym. Stamtąd ulica Krakowskie Przedmieście biegnąc na południe przechodzi w ulicę Nowy Świat. Ta z kolei wpada w Plac Trzech Krzyży. Trakt Królewski kontynuowany jest w kierunku południowym Alejami Ujazdowskimi, na przebiegu których znajduje się Plac Na Rozdrożu (ryc. 1). Trakt Królewski sprzężony jest z wieloma innymi założeniami



urbanistycznymi, w tym z wielkoprzestrzennymi założeniami urbanistycznymi oraz z systemem siedmiu placów Warszawy.

Wśród warszawskich wielkoprzestrzennych założeń urbanistycznych wyróżniamy Oś Saską i Oś Stanisławowską znajdujące się w centralnej części Warszawy oraz Oś Królewską na południu miasta. Do tzw. siedmiu placów Warszawy zaliczamy place znajdujące się wokół Ogrodu Saskiego, czyli place: Piłsudskiego, Małachowskiego, Dąbrowskiego, Grzybowski, Żelaznej Bramy, Bankowy i Teatralny (Stępiński 1988).

W niniejszym rozdziale przyjrano się wpływowi oświetlenia zewnętrznego na odbiór dwóch ciągów wewnątrz urbanistycznych. Jeden z nich pokrywa się z przebiegiem Osi Stanisławowskiej na odcinku zaczynającym się Placem Na Rozdrożu na wschodzie i kończącym się skrzyżowaniem ulic Nowowiejskiej / Krzywickiego na zachodzie. Jest to najdłuższy ciągły fragment założenia. Liczące dawniej ponad 7 km założenie widokowe (od Kanału Piaseczyńskiego do kościoła św. Wawrzyńca), na przestrzeni lat zostało zdekomponowane szeregiem inwestycji infrastrukturalnych (Wagner 2011). Analizowany jego fragment ograniczony jest Trasą Łazienkowską na wschodzie i Zespołem Stacji Filtrów na zachodzie.

Przeanalizowano również ciąg ulic, wpisanych do rejestru zabytków, pozostających w sprzężeniu z niektórymi wnętrzami z zespołu siedmiu placów Warszawy. Mowa tutaj o ciągu ulic Chłodna – Elektoralna – Senatorska i o leżących na ich przebiegu placach Bankowym, Teatralnym (oba z zespołu siedmiu placów Warszawy) i Zamkowym. W SUiKZP postuluje się „uczytelnienie i wyeksponowanie w strukturze przestrzennej wzajemnych powiązań placów i ulic ze szczególnym uwzględnieniem zespołu siedmiu placów Warszawy” (SUiKZP 2021).

Trasa spaceru nr 1 składa się z ciągu wewnątrz urbanistycznych:

- ul. Nowowiejska / Plac Politechniki / ul. Nowowiejska / Plac Zbawiciela / al. Wyzwolenia / Plac Na Rozdrożu (ryc. 2),

Trasa spaceru nr 2 składa się z ciągu wewnątrz urbanistycznych:

- ul. Chłodna / ul. Elektoralna / Plac Bankowy / ul. Senatorska / Plac Teatralny / ul. Senatorska / Plac Zamkowy (ryc. 3).

Dla każdej z wybranych tras wyznaczono dwie krzywe wrażeń: jedną dla widoku dziennego i jedną dla widoku nocnego. Następnie porównano wykres krzywej z zapisem wrażeń z przejścia każdej trasy za dnia i w nocy. Krzywa wrażeń, jako narzędzie równie subiektywne co względne, pozwala na tego typu porównania. Względność krzywej wrażeń polega na tym, że pierwszą ocenę

wystawiamy dla pierwszego napotkanego widoku, a każdy kolejny z nim porównujemy (Wejchert 2010). Narzędzie służy zatem nie do oceny wartością bezwzględną danego widoku, a do względnej jego waloryzacji w porównaniu z innymi widokami.



Ryc. 2. Wnętrza urbanistyczne na trasie spaceru nr 1 (opracowanie własne na podstawie BDOT).



Ryc. 3. Wnętrza urbanistyczne na trasie spaceru nr 2 (opracowanie własne na podstawie BDOT).

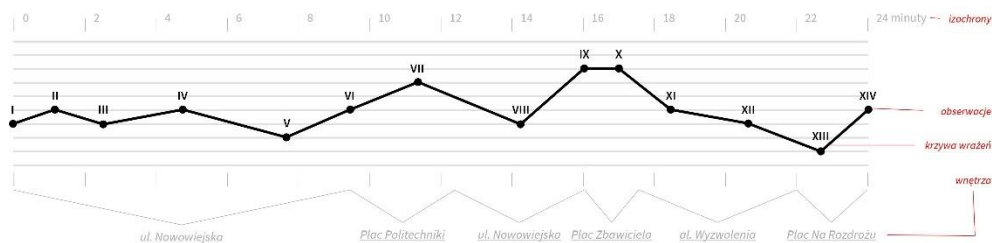
Przy tworzeniu krzywej wrażeń posłużono się kryteriami zaproponowanymi przez Wejcherta, czyli zwracano uwagę na złożoność układu, formę architektoniczną budynków, detale urbanistyczne obecne we wnętrzach,

sprężenia z układami sąsiednimi i tymi położonymi dalej, obecność dominant i otwarcie widokowych.

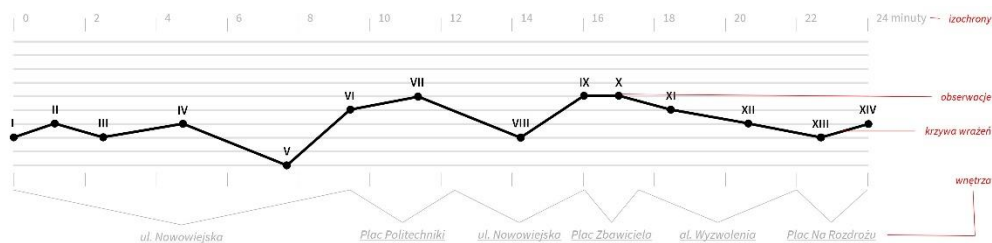
W tym badaniu obserwator (autor niniejszego rozdziału) zatrzymywał się przy bardziej czytelnych otwarcach widokowych. Zakres ocenianego widoku zależał od rozległości wnętrza (w przypadku ulicy o wąskim przekroju był węższy, na rozległych placach miejskich szerszy). Wizualizacją zakresu widoku są znaczniki na grafikach ilustrujących przebieg wnętrza (ryciny 2 i 3).

## Wyniki analiz

Analiza krzywych wrażeń dla wybranych ciągów wnętrza urbanistycznych pokazuje, że wprowadzenie oświetlenia zewnętrznego wpływa na odbiór krajobrazu miejskiego. Zmiana pomiędzy widokami nocnymi i dziennymi przebiegała w obu kierunkach – oświetlenie zewnętrzne zarówno pogarszało, jak i poprawiało czytelność wnętrza urbanistycznych.



Ryc. 4. Krzywa wrażeń dla widoków dziennych trasy spaceru nr 1.



Ryc. 5. Krzywa wrażeń dla widoków nocnych trasy spaceru nr 1.

Ryciny 4 i 5 ilustrują kształt krzywej wrażeń dla trasy spaceru nr 1. Poniżej wykresu krzywej wrażeń dodano zasięgi poszczególnych wnętrza urbanistycznych. Powyżej wykresu umieszczono izochrony pokazujące jaką odległość na trasie spaceru można pokonać w 2 minuty. Na samym wykresie cyframi rzymskimi oznaczono poszczególne widoki.

W zdecydowanej większości oceny widoków dziennych były wyższe, niż oceny widoków nocnych (w 10 z 14 przypadków). Często wynikało to po prostu z niedostatecznego oświetlenia wnętrza urbanistycznych w porze nocnej.

W przypadku przestrzeni ocenionej za dnia najwyżej (Pl. Zbawiciela, widoki IX i X), w porze nocnej ocena była niższa o 2 punkty. Odnotowano również sytuację, w której sztuczne oświetlenie wpływało dodatnio na odbiór wnętrza urbanistycznego. W tabelach zamieszczonych na kolejnych stronach zawarto opisy wybranych różnic widoków dziennych i nocnych.

Tabela 1. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku I trasy spaceru nr 1.



Tabela 2. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku VIII trasy spaceru nr 1.



Już w widoku I (Tabela 1) widać ujemny wpływ sztucznego oświetlenia na atrakcyjność przestrzeni miejskiej. Dominujący za dnia budynek mieszkalny, nocą znika przez nadmierny kontrast oświetleniowy, wprowadzony do przestrzeni wnętrza za pomocą latarni ulicznej.

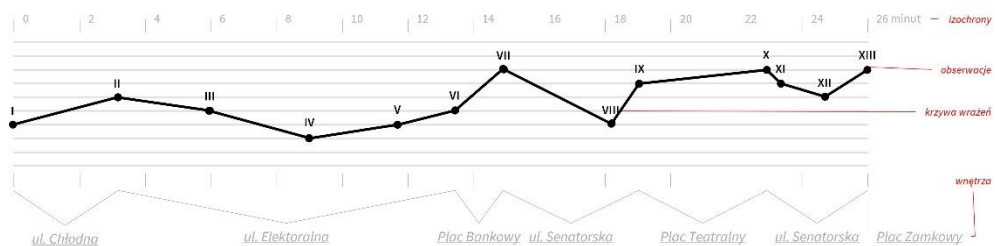
W widoku VIII (Tabela 2) mamy do czynienia z rozmieszczeniem oświetlanych płaszczyzn i przestrzeni w sposób dość przypadkowy. Już za dnia mało atrakcyjne wnętrze, po zmroku jeszcze traci. Rzęsiście oświetlone zejścia do metra i reklamy zajmujące powierzchnie boczne brył budynków wprowadzają pewien nieporządek. Obrazu dopełnia oświetlona attyka jednego z budynków mieszkalnych – mimo wyraźnego jej zaistnienia w przestrzeni, nie jest jasne w jaki sposób wnętrze, w którym się znajduje, jest połączone z tym z widoku VIII na poziomie ulicy.

Tabela 3. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku XIV trasy spaceru nr 1.



Latarnie zawieszane po 5 na jednym słupie, mające atrakcyjną wizualnie formę za dnia, nocą sprawiają, że obraz ulega spłaszczeniu. Znikają znajdujące się za dnia w tle zabudowania Osiedla Latawiec.

Ryciny 6 i 7 ilustrują kształt krzywej wrażeń dla trasy spaceru nr 2.

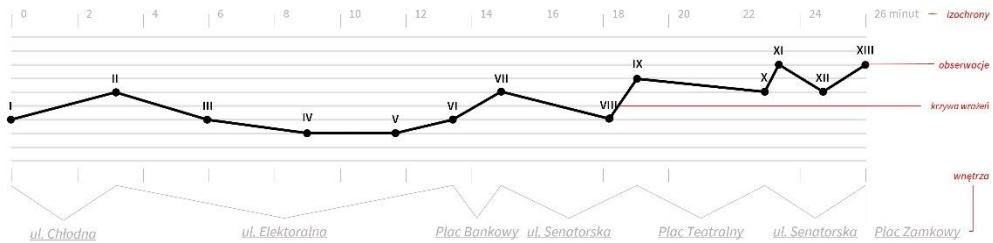


Ryc. 6. Krzywa wrażeń dla widoków dziennych trasy spaceru nr 2.

Zarówno w przypadku widoków dziennych jak i nocnych, pierwsza część spaceru (patrzac od strony zachodniej, tj. od ul. Chłodnej, obserwacje I–VI) plasuje się blisko środka albo tuż poniżej środka skali. Większe zmiany zachodzą



od Placu Bankowego. Za dnia zarówno Plac Bankowy, jak i Plac Teatralny otrzymały bardzo wysoką notę, tj. 8 punktów. Przy oświetleniu zewnętrznym ocena obu wnętrz spadła.



Ryc. 7. Krzywa wrażeń dla widoków nocnych trasy spaceru nr 2.

W przypadku widoku III za dnia widoczna jest różnorodność architektoniczna układu, otwarcia i powiązania widokowe w kierunku północnym (za pomocą pierzei ulicy), wschodnim i południowym.

W widoku nocnym nagromadzenie świateł, reklam i oświetlenia drogowego, po lewej stronie (w miejscu otwarcia w kierunku północnym) zatrzymuje wzrok, zaburzając ciągłość połączenia z przestrzenią sąsiadującą. Rzęsiste oświetlenie po prawej stronie (w miejscu połączenia z dalszymi widokami w kierunku południowym) działa podobnie (Tabela 4).

Tabela 4. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku III trasy spaceru nr 2.

Widok dzienny	
Widok nocny	

W przypadku widoku VI za dnia widoczny jest budynek przy skrzyżowaniu ul. Senatorskiej i Bielańskiej (u wrót Placu Teatralnego). W bliższej perspektywie widać dokładnie detal elewacji Teatru Capitol. Przy oświetleniu zewnętrznym, zarówno dalsze (skrzyżowanie Senatorska / Bielańska), jak i bliższe

(ul. Senatorska / Pl. Bankowy) powiązania widokowe stają się niewidoczne. Zanika również detal elewacji Teatru Capitol (Tabela 5).

Tabela 5. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku VI trasy spaceru nr 2.

Widok dzienny	
Widok nocny	

W widoku dziennym Placu Bankowego (widok VII) obserwowanego od strony południowej widzimy wyraźnie zarysowaną dominantę Błękitnego Wieżowca. Na lewo od niej mamy otwarcie widokowe prowadzące wzrok w kierunku Muranowa. Jeszcze bardziej w lewo, w zachodniej ścianie placu, widzimy Gmach Giełdy i Banku Polskiego, którego zakrzywiona elewacja sugeruje połączenia z kolejnym wnętrzem urbanistycznym (Tabela 6).

Tabela 6. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku VII trasy spaceru nr 2.

Widok dzienny	
Widok nocny	

W widoku nocnym oprawy zamontowane na wysokich wysięgnikach sprawiają, że zarówno bryła Błękitnego wieżowca, jak i otwarcie w kierunku Muranowa stają się niewidoczne.

W widoku dziennym Teatr Narodowy (widok X) zdecydowanie dominuje we wnętrzu urbanistycznym, zarówno rozmiarem, formą jak i znaczeniem. W widoku nocnym element ten przegrywa w uwadze obserwatora z elewacjami budynków znajdujących się po przeciwnej stronie placu, na które pada światło latarni ulicznych (Tabela 7).

Tabela 7. Wyniki obserwacji dziennych i nocnych widoku X trasy spaceru nr 2.

Widok dzienny	
Widok nocny	

## Zakończenie i wnioski

Krzywa wrażeń Wejcherta jest znaną i wykorzystywaną metodą waloryzacji krajobrazu. Mechanizm działania krzywej wrażeń zakłada porównanie poszczególnych widoków, stosując przyjęte wcześniej kryteria. Sam wykres krzywej wrażeń jest zatem umownym i względnym porównaniem jakościowym kolejnych widoków (Wejchert 2010).

Wyniki badań opisanych w niniejszym rozdziale wskazują, że metoda krzywej wrażeń Wejcherta znajduje zastosowanie w analizach oświetlenia przestrzeni miejskiej. Metoda pozwoliła zidentyfikować sytuacje oświetleniowe, w których wprowadzenie oświetlenia zewnętrznego do przestrzeni miejskiej wpływa negatywnie na jej odbiór.

Szczególnie destruktywny dla orientacji w przestrzeni miejskiej jest chaos świetlny, spowodowany przez zbyt duże kontrasty luminancji w przestrzeni i czasie (Kotarba 2019). Jest on przyczyną dezorientacji, odwracając uwagę od informacji istotnych.

Użycie krzywej wrażeń pozwoliło na identyfikację przestrzeni, w których dochodzi do zanieczyszczenia światłem, również w formie chaosu świetlnego.



Zidentyfikowane przykłady zanieczyszczenia światłem i jego negatywnych skutków, zaobserwowane dzięki porównaniu widoków dziennych i nocnych to:

- nagromadzenie świateł, reklam i oświetlenia drogowego, które zatrzymuje wzrok, osłabiając powiązanie widokowe z przestrzenią sąsiadującą,
- oświetlenie zewnętrzne powodujące zbyt duże kontrasty, co z kolei sprawia, że obiekty (w tym dominanty) będące częścią krajobrazu za dnia, w nocy stają się niewidoczne,
- odciąganie wzroku od wartościowych obiektów, przez zbyt duże natężenie źródła światła, powodujące olśnienie.

Metoda krzywej wrażeń Wejcherta jest zatem skutecznym narzędziem detekcji zanieczyszczenia światłem w przestrzeni miejskiej, przyjmującego formę m.in. chaosu świetlnego.

## Literatura

- Bazan-Krzywoszańska A., Mrówczyńska M., Skiba M., 2015. Badania percepcji mieszkańców Zielonej Góry – mapy mentalne. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury* 62(4).
- Brainard G.C., Rollag M.D., Hanifin J.P., 1997. Photic regulation of melatonin in humans: ocular and neural signal transduction. *Journal of Biological Rhythms* 12(6).
- Cullen G., 2011. *Obraz miasta*. Wydanie skrócone. Ośrodek „Brama Grodzka – Teatr NN”, Lublin.
- Garstang R.H., 1986. Model for artificial night-sky illumination. *Astronomical Society of Pacific* 98(106).
- Hawrot W., 2016. Zmiany atrakcyjności krajobrazu gór i Pogórza Kaczawskiego wzdłuż doliny Kaczawy, Topiariusz. *Studia Krajobrazowe*.
- Janiszek M., Majorek A., 2017. Waloryzacja przestrzeni miejskiej na podstawie projektów zrealizowanych w ramach budżetu obywatelskiego. *Biuletyn Komitetu Przestrzennego Zagospodarowania Kraju PAN* 268.
- Jaszczuk K.L., 2020. Analysis of the possibilities of land development along communication arteries on the example of the Trakt Brzeski in Warszawa. *Dysertacja doktorska*, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Kołomański S., 2013. Zanieczyszczenie światłem i ciemność. *Prace i Studia Geograficzne* 53.
- Kotarba A. (red.), 2019. *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badan Kosmicznych PAN, Warszawa, 198 s.
- Kupidura A., Bielska A., Rogoziński R., 2011. Analiza i ocena krajobrazu wizualnego wsi na potrzeby opracowania planów rozwoju obszarów wiejskich. *Studia Komitetu Przestrzennego Zagospodarowania Kraju PAN* 142.
- Malinowska E., 2010. Wpływ atrakcyjności wizualnej krajobrazu na potencjał turystyczny Narwiańskiego Parku Narodowego i jego otuliny. *Problemy Ekologii Krajobrazu* 27.

- Młynarczyk Z., Potocka I., Rogowski M., 2015. *Zastosowanie nowatorskich narzędzi do obiektywizacji ocen atrakcyjności wizualnej krajobrazu – metodyka i przebieg eksperymentu. Geograficzne aspekty rozwoju turystyki. Prace z zakresu turystyki i rekreacji*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Pisarek M., Gargała-Polar M., 2019. Waloryzacja przyrodnicza i kulturowa złotego szlaku turystycznego „Dookoła Rzeszowa”. *Zeszyty Naukowe. Turystyka i Rekreacja* 1 (23).
- Pożarowski-Bieniak M., 2021. Morfologia i znaczenia światła projektowanego w widokach i sekwencjach widokowych krajobrazu miasta. *Dysertacja doktorska*, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa.
- Rich C., Longcore T., 2004. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(4).
- Riegel K.W., 1973. Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy. *Science* 179. 4080.
- Rostek J., Senetra A., 2012. Możliwości wykorzystania metod interpolacji do regionalizacji i wyznaczania granic krajobrazów obszarów wiejskich i stref przejściowych. *Studia Obszarów Wiejskich* 29.
- Senetra A., 2010. Wpływ metodyki oceny walorów krajobrazowych na wyniki szacowania nieruchomości. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum* 9(2).
- Squires W.A., Hanson H.E., 1918. The destruction of birds at the lighthouses on the coast of California. *The Condor* 20(1).
- Stępiński Z., 1988. *Siedem placów Warszawy*. PWN, Warszawa.
- SUiKZP, 2021. *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy*. Uchwała nr LIII/1611/2021 Rady m.st. Warszawy z 26 sierpnia 2021 r.
- Szmidt B., 1981. *Ład przestrzeni*. Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa.
- Wagner A., 2011. Styk trzech dzielnic Warszawy: Śródmieście, Mokotowa i Ochoty w okresie międzywojennym – wpływ podziału własnościowego (państwo, wojsko, miasto) na typ realizowanej architektury. *Kwartalnik Architektury i Urbanistyki* 56(3).
- Wejchert K., 2010. *Elementy kompozycji urbanistycznej*. Arkady.

## Streszczenie

Zanieczyszczenie światłem występuje nie tylko w formie sztucznego rozświetlenia nocnego nieba. Ma wiele innych wariantów, wśród których znajdziemy również chaos świetlny, wpływający szczególnie negatywnie na odbiór przestrzeni miejskiej. Do powstawania chaosu świetlnego przyczyniać się mogą instalacje oświetleniowe, spełniające funkcje zarówno użytkowe, jak i dekoracyjne. W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładową analizę waloryzacji krajobrazu metodą krzywej wrażeń Wejcherta, celem sprawdzenia jej przydatności do identyfikacji chaosu świetlnego w przestrzeni miejskiej. Przeanalizowano ciągi sprzężonych wewnątrz urbanistycznych, zlokalizowanych w śródmieściu Warszawy. Porównano wykresy krzywej wrażeń dla widoków dziennych i nocnych, sprawdzając, czy oświetlenie zewnętrzne wpływa negatywnie na odbiór nocnych widoków wewnątrz urbanistycznych. Wyniki analiz pokazują, że nieodpowiednie wprowadzenie oświetlenia zewnętrznego do przestrzeni miejskiej może przyczyniać się do powstawania zjawiska zanieczyszczenia światłem w formie chaosu świetlnego. Krzywa wrażeń zaś może posłużyć jako efektywne narzędzie jakościowego badania służącego ocenie wpływu oświetlenia zewnętrznego na przestrzeń miejską.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, chaos świetlny, metoda krzywej wrażeń.

## Wejchert's impression curve method as a tool for identifying light pollution in urban space

### Summary

Light pollution occurs not only in the form of artificial luminance night sky. It has many other variants, among which we will also find light clutter, which has a particularly negative impact on the perception of urban space. Lighting installations fulfilling both utilitarian and decorative functions may contribute to the formation of light clutter. In this chapter, it was checked whether the method of landscape valuation, which is the Wejchert's impression curve, can be used as a tool for identifying light clutter in urban space. Ensembles of coupled urban interiors located in the centre of Warsaw were analysed. The graphs of the impression curve for diurnal and nocturnal views were compared, checking whether artificial lighting negatively affects the reception of night time townscape. The results of the analyses show that the introduction of artificial light into urban space in an inappropriate way may contribute to the phenomenon of light pollution in the form of light clutter. The impression curve can be used as an effective tool to assess the impact of outdoor lighting on urban space.

**Key words:** light pollution, light clutter, impression curve method.

### Dane kontaktowe autora:

**Hubert Horynek**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Geodezji i Kartografii  
e-mail: hubert.horynek@pw.edu.pl

Wiktoria Kocięda, Paweł Bogawski

## Tendencje zmian zanieczyszczenia sztucznym światłem w Wielkopolsce w latach 1992–2013

### Wprowadzenie

Rozwój miast przyczynił się do powstawania wielu zanieczyszczeń, a jednym z najrządziej badanych jest zanieczyszczenie świetlne, które powstaje przez emisję strumienia sztucznego światła w górną półprzestrzeń (Sielachowska i Zajkowski 2019). Dzieje się to na przykład w wyniku użytkowania nieprawidłowo obudowanych, wypukłych lamp rozprzestrzeniających światło na większym obszarze (Sala 2020). Termin „zanieczyszczenie światłem” istnieje od 1985 roku (Verheijen 1985) i opisuje dwa rodzaje skutków zanieczyszczenia sztucznym światłem. Pierwszy z nich – biologiczno-ekologiczny, to przede wszystkim szkodliwe oddziaływanie sztucznego światła na środowisko, które m.in. zakłóca przebieg procesów życiowych przez zwiększenie czasu trwania okresu jasności kosztem okresu ciemności. Przykładowo, w wyniku pojawienia się sztucznych źródeł światła nocą wykazano trudności w znalezieniu samicy przez samce świetlika świętojańskiego *Lampyrus noctiluca* (Bird i Parker 2014). Zauważono także, że młode żółwie morskie kierują się do miasta, oświetlonego sztucznym światłem, a nie do wody, odbijającej światło księżyca (Salmon i in. 1995, za: Tałanda 2015). Duża ilość sztucznego światła nocą jest także powodem wielu problemów zdrowotnych ludzi, takich jak bóle migrenowe głowy, zmęczenie, bezsenność, czy większe ryzyko zachorowania na depresję oraz choroby nowotworowe ze względu na zahamowanie wytwarzania nocą melatoniny (Kołomański 2014). Drugim ze skutków jest astronomiczne zanieczyszczenie światłem, które stanowi znaczne utrudnienie podczas obserwacji obiektów astronomicznych. Na terenie miejskim niebo jest rozświetlone często w takiej

mierze, że widoczny jest jedynie księżyc i największe gwiazdy (Kołomański 2014). Analizy jakości nieboskłonu dokonuje się przykładowo według skali Bortle'a przedstawiającej 9 jego klas, od idealnie ciemnego nieba, poprzez wiejskie i miejskie niebo, aż do nieba centrów miast (Bortle 2001). W tym celu korzysta się z urządzeń fotometrycznych, mierników luminancji lub luksomierzy, wykorzystujących wiązki światła (Sielachowska i Zajkowski 2019). Obecnie można wyróżnić 4 wyraźne typy zanieczyszczenia świetlnego: łuna miejskiego nieba, światło zabłąkane, przewymiarowanie światła, oraz niezwykle brząca, lecz szkodliwa – symfonia światła (Nawalkowski 2022). Każdy z wyżej wymienionych typów powoduje problemy na tle ekologicznym, ekonomicznym, astronomicznym, bezpieczeństwa, zdrowotnym i estetycznym, a szkodliwość ich skutków przyrównuje się do tych, które powodowane są przez inne źródła zanieczyszczeń.

Pojawianie się istotnych skutków zanieczyszczenia światłem sprawia, że ważne staje się dokładne rozpoznanie zmienności przestrzennej i czasowej zjawiska zanieczyszczenia światłem. Istnieją wartościowe dane na ten temat pochodzące z rejestracji satelitarnych, a najdłuższa seria wiarygodnych i porównywalnych danych dotyczy okresu 1992–2013. W niniejszym rozdziale opisano wyniki badań tendencji zmian w zanieczyszczeniu światłem sztucznym nocą na terenie województwa wielkopolskiego w latach 1992–2013. Celem analiz było określenie skali zjawiska, zarówno na obszarach miejskich jak i wiejskich. W ramach przeprowadzonych badań wskazano obszary, w których w badanym okresie natężenie sztucznego światła znacznie wzrosło, oraz te, gdzie zmiany były tylko nieznaczne.

## **Obszar badań**

Szczegółową analizą objęto obszar województwa wielkopolskiego, drugiego w kraju pod względem zajmowanej powierzchni. Wynosi ona dokładnie 29 826 km<sup>2</sup>, co stanowi 9,53% obszaru Polski. Badane województwo jest trzecim pod względem liczby mieszkańców, która wynosi 3 496 500 (Główny Urząd Statystyczny 2021). Liczba ludności miejskiej w roku 2020 wynosiła 1 877 319 (53,5%), a liczba ludności wiejskiej 1 619 131 (46,3%) (GUS 2021). Wartości te są zbliżone, mimo, że obszary miejskie zajmują znacznie mniejszą powierzchnię, niż obszary wiejskie. Oprócz 113 gmin wiejskich i 19 gmin miejskich, w województwie wyróżniono również 94 gminy miejsko-wiejskie. Największym miastem tego regionu administracyjnego i jednocześnie jego stolicą oraz centrum kulturalnym, naukowym i gospodarczym jest Poznań. W 2016 roku mieszkańcy Poznania stanowili 15,6% całkowitej ludności województwa (*Raport o stanie...* 2016). Innymi większymi miastami, których

liczba ludności przekracza 50 tysięcy są: Kalisz, Konin, Piła, Ostrów Wielkopolski, Gniezno i Leszno. Województwo wielkopolskie wykazuje charakter rolniczo-przemysłowy. Użytki rolne zajmują ponad 50% powierzchni województwa, a jego lesistość 25,8% (*Rocznik Statystyczny...* 2021). Rozmieszczenie lasów jest nierównomierne, północne, zachodnie i południowe tereny województwa charakteryzują się największym stopniem zalesienia. Na obszarze całego województwa wielkopolskiego obecne są zwarte kompleksy leśne, takie jak Puszcza Notecka, Lasy Kórnickie, Leśny Kompleks Promocyjny Lasy Rychtałskie czy Dąbrowy Krotoszyńskie. Tereny chronione stanowią około 31,7% powierzchni całkowitej, a obszary zurbanizowane zajmują 5,8% (*Rocznik Statystyczny...* 2021). Województwo charakteryzuje się silnie rozwiniętą infrastrukturą drogową, kolejową, a także lotniczą. Najważniejszymi drogami jest autostrada A2 i drogi ekspresowe S5 oraz S11. Długość eksploatowanych linii kolejowych w 2011 roku wynosiła 2 091 km, co stanowiło około 10% długości linii kolejowych w Polsce. Dwanaście linii ma charakter krajowy, a cztery międzynarodowy. Gęstość sieci jest zróżnicowana, najmniejszą obserwuje się na południowym wschodzie, co spowodowane jest powojenną historią tego terenu (Bała 2018). W województwie zlokalizowane są 3 główne ośrodki komunikacji lotniczej: dwie bazy lotnictwa wojskowego – Poznań-Krzesiny oraz Powidz, a także cywilny międzynarodowy Port Lotniczy Ławica Poznań. Zarówno ośrodki przemysłowe jak i inne tereny związane z działalnością antropogeniczną mieszczą się zazwyczaj w okolicach największych miast, i to z nimi zwykle związane jest wyższy poziom zanieczyszczenia światłem.

### **Dane i metody badawcze**

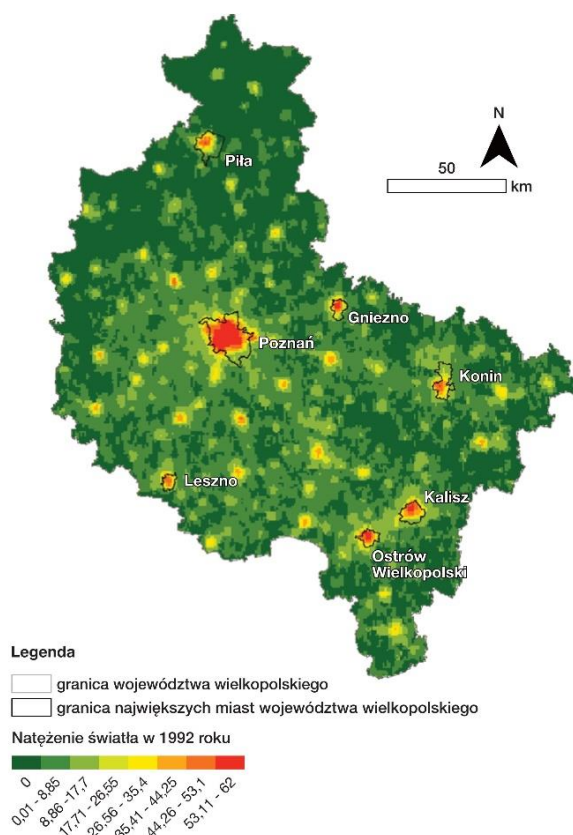
Dane ilościowe dotyczące natężenia światła zewnętrznego udostępnione zostały przez amerykański Program Meteorologiczny Obrony Sił Powietrznych, w którym wykorzystywano czujniki satelitarne, zdolne do wykrywania źródeł emisji promieniowania w zakresie widzialnym i podczerwieni. Dane te pobrano za pomocą aplikacji Google Earth Engine (GEE), która jest zarówno systemem, jak i repozytorium systematycznie aktualizowanych zdjęć satelitarnych i analiz meteorologicznych. Dostęp do tego repozytorium jest otwarty i każdy posiadający konto w serwisie Google może z niego korzystać. Zaletą systemu GEE jest to, że można najbardziej czasochłonne analizy wykonywać na serwerze Google, gdzie trwa to o wiele krócej, niż gdyby te dane pobierać na komputer osobisty i dopiero wówczas analizować. W pobranym zestawie danych emisja sztucznego światła była rejestrowana jako jaskrawość piksela o wartości z przedziału od 0 do 62, przy czym 62 oznaczało maksymalne natężenie światła sztucznego, natomiast 0 jego brak. Spośród dostępnych warstw danych

wykorzystano pasmo światła stabilnego, tzw. *stable lights* ze zbioru danych Nighttime Lights Time Series Version 4. Jest to światło miast, wsi i innych miejsc z trwałym oświetleniem (GEE 2022). Warto tu zaznaczyć, że na zanieczyszczenie sztucznym światłem w nocy wpływają również okresowe źródła światła, głównie wszelkiego rodzaju ruch drogowy. Ze względu jednak na cel badań dotyczący zmian wieloletnich, dla analiz porównawczych wykorzystano jedynie źródła stabilne, zilustrowane z rozdzielczością terenową około 1 km.

W celu przetworzenia statystycznego danych pobranych z repozytorium GEE wykorzystano program R Studio. Obliczono natężenie sztucznego światła w każdym roku i zwizualizowano te obliczenia dla początku (rok 1992) i końca (rok 2013) przyjętego okresu analizy. Następnie obliczono tendencje zmian zanieczyszczenia sztucznym światłem na terenie Wielkopolski w przyjętym przedziale czasowym 1992–2013. W pracy określono tendencje dla każdego miejsca w województwie i sprawdzono, gdzie są one istotne statystycznie na poziomie  $p \leq 0,05$ . Istotność zmian natężenia światła zbadano za pomocą testu Mann-Kendalla z korektą ciągłości dla szeregów czasowych. Oblicza on statystykę nieparametryczną Tau Kendalla dla trendu monotonicznego. Wykorzystano także estymator Theil-Sena, który pozwala na określenie nasilenia badanych zmian. Te zmiany zostały wyrażone w formie liczbowej bezwymiarowej, jako współczynnik nachylenia prostej  $a$  (wartości w przedziale 0–2,5). Współczynnik nachylenia prostej  $a=1$  oznacza wzrost natężenia światła o jedną jednostkę na rok. Wszędzie, gdzie mowa jest o zmianach lub tendencji natężenia światła i podawane są wartości liczbowe, to wartości dodatnie oznaczają wzrost natężenia światła w badanym okresie. Przetestowano też, czy różnice w zmianach natężenia światła między obszarami miejskimi a wiejskimi są istotne statystycznie. Test Shapiro-Wilka wykazał, że dane dla gmin wiejskich nie są zgodne z rozkładem normalnym, dlatego do zbadania istotności statystycznej tendencji natężenia światła między gminami miejskimi i wiejskimi wykorzystano test nieparametryczny Manna-Whitneya.

## **Wyniki analiz**

Największe wartości natężenia sztucznego światła w 1992 roku zaobserwowano głównie w granicach największych miast województwa. Poza tymi miastami wysokie, choć nie tak znaczące wartości natężenia światła, osiągała centralna część województwa wielkopolskiego. Najmniejsze wartości natężenia sztucznego światła w badanym roku odnotowano w północnej oraz zachodniej części województwa. Na niektórych terenach ta wartość była równa 0, głównie w północnej oraz wschodniej części województwa (ryc. 1).



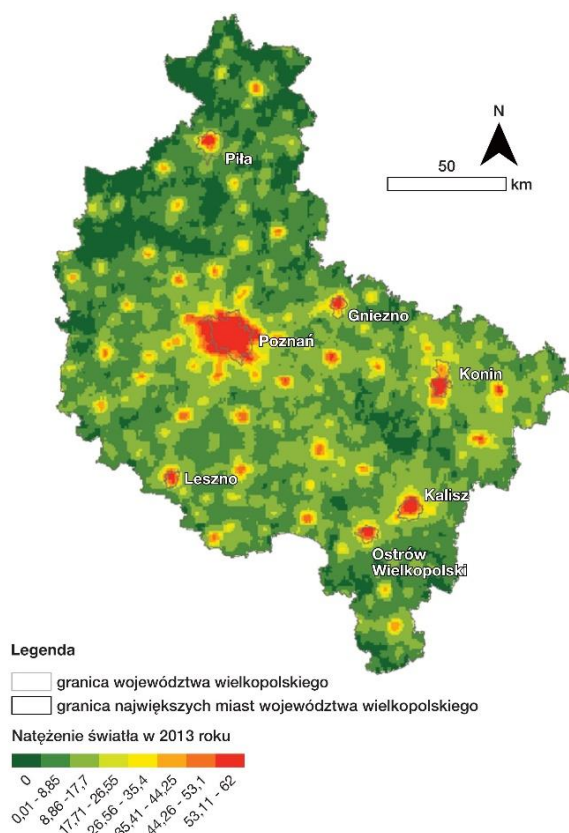
Ryc. 1. Natężenie sztucznego światła w województwie wielkopolskim w 1992 roku.

Największe wartości natężenia sztucznego światła w 2013 roku odnotowano nie tylko w granicach największych miast województwa, ale również poza nimi, a także w mniejszych miejscowościach. Obszary o najmniejszych wartościach to nadal północna oraz zachodnia część województwa, choć zaobserwowano mniejszy udział obszarów o wartości tego parametru równej 0. Wzrosła liczba obszarów o średnich wartościach natężenia, głównie były to centralna i południowa część województwa. Najmniejszych wartości najczęściej odnotowano w północnej części obszaru analizy (ryc. 2).

W latach 1992–2013 największa zmiana wzrostowa zaszła w centralnej części województwa wielkopolskiego, na obrzeżach Poznania i Konina oraz w otaczających te miasta gminach, w kierunku południowym i zachodnim. Znaczący wzrost natężenia światła zaobserwowano też na obszarach mniejszych miast (ryc. 3), na przykład w Złotowie, Śremie, Gostyniu, Jarocinie, Grodzisku Wielkopolskim, Wrześni, Słupcy oraz Turku. Z kolei w Pile odnotowano niewielką zmianę natężenia światła sztucznego w porównaniu do innych dużych

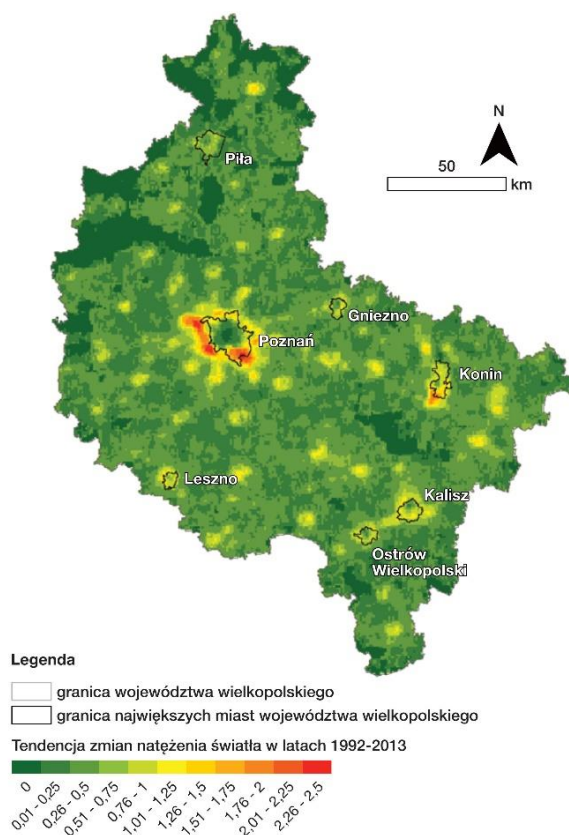


miast województwa, których liczba mieszkańców przekracza 50 tysięcy. Poza Piłą brak trendu lub znikomą tendencją wzrostową zaobserwowano głównie na północy województwa wielkopolskiego. Terenami, których wartości w pojedynczych pikselach były nieistotne statystycznie względem poziomu istotności  $\alpha=0,05$  były głównie obszary leśne (np. Puszcza Notecka, Lasy Czarniejewskie). Do najbardziej zróżnicowanych miast pod względem zmian wartości natężenia światła w okresie 1992–2013 zaliczają się Poznań, Konin, Kalisz oraz Złotów.



Ryc. 2. Natężenie sztucznego światła w województwie wielkopolskim w 2013 roku.

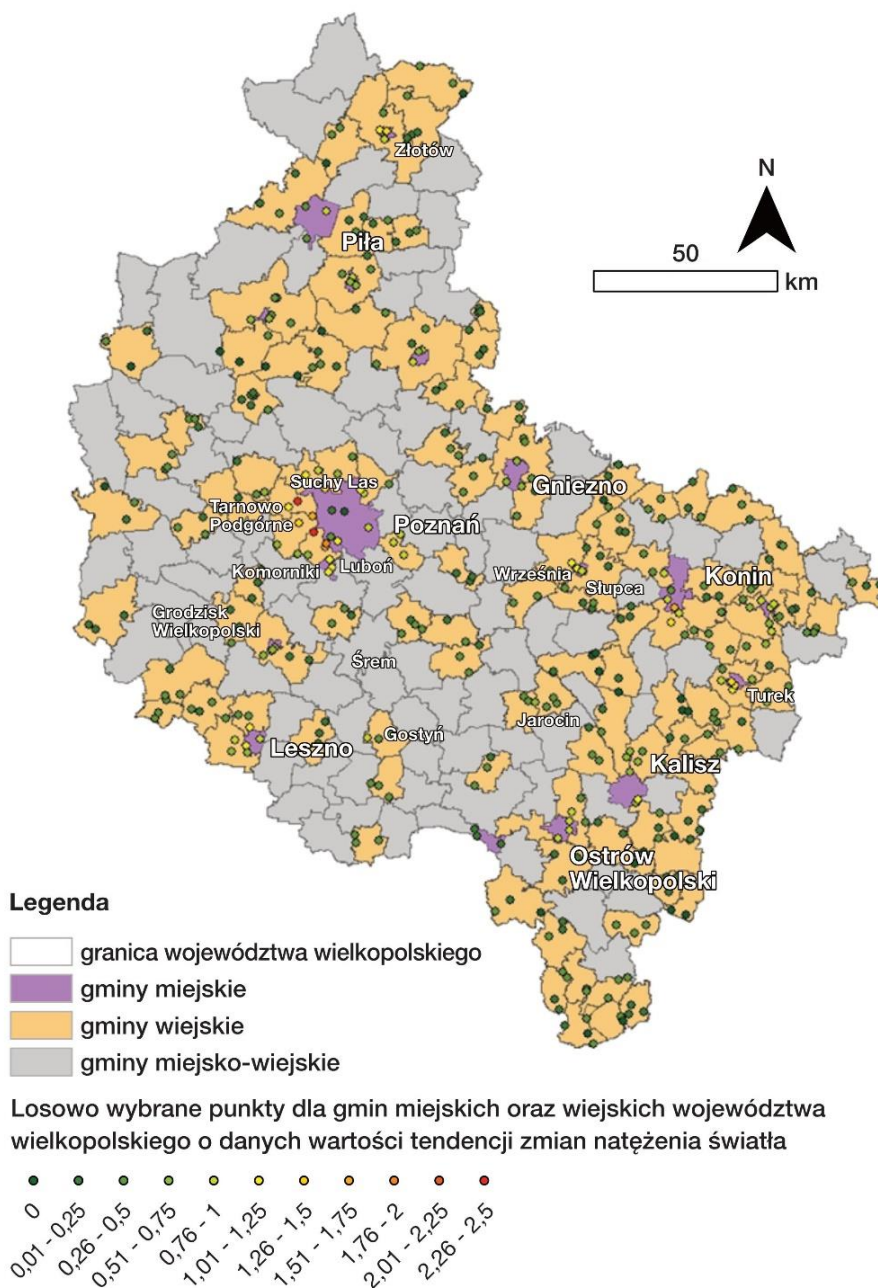
W przeprowadzonych badaniach porównano także zmiany natężenia światła pomiędzy obszarami miejskimi oraz wiejskimi. W tym celu wylosowano trzy punkty na obszarze każdej gminy wiejskiej i miejskiej (gminy miejsko-wiejskie nie były uwzględnione w tej części analiz). Dla tych punktów obliczono dokładną wartość współczynnika nachylenia prostej (tendencji zmian – im wyższy tym większa zmiana).



Ryc. 3. Tendencje zmian natężenia sztucznego światła w województwie wielkopolskim w latach 1992–2013.

Największe zmiany tego parametru zaobserwowano w gminach wiejskich otaczających Poznań: Komorniki, Tarnowo Podgórne i Suchy Las, oraz niewiele mniejsze w gminach miejskich: Konin, Luboń i Złotów (ryc. 4). Wyższe wartości tendencji zmian natężenia światła zaobserwowano w gminach wiejskich w niedalekiej odległości od dużych miast. Na terenach innych gmin wiejskich nie zaobserwowano znaczącej tendencji zmiany natężenia światła. W przypadku obszarów wiejskich najczęściej losowych punktów miało wartości zmian mieszczących się w przedziale od 0,30 do 0,38. Punkty na obszarach miejskich charakteryzowały się często zmianami w przedziałach od 1 do 1,17 oraz od 0,62 do 0,78 (ryc. 5). We wschodniej i południowo-zachodniej części województwa zaobserwowano punkty o bardzo niskich wartościach zmian natężenia światła. Ostatecznie, na podstawie danych ze wszystkich gmin miejskich i wiejskich można stwierdzić występowanie istotnie statystycznie większych zmian ( $W=16009$ ;  $p<0,001$ ) w natężeniu sztucznego światła na terenie gmin miejskich

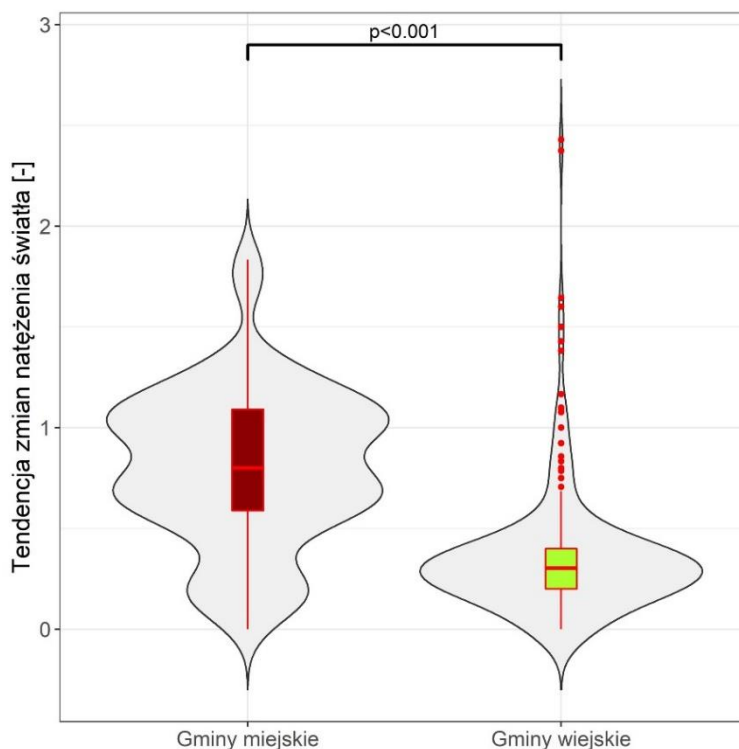
(mediana współczynnika nachylenia prostej = 0,8) w porównaniu z wiejskimi (współczynnik nachylenia prostej = 0,3).



Ryc. 4. Rozkład przestrzenny punktów wylosowanych do porównania zmian natężenia światła w gminach miejskich i wiejskich (w każdej z gmin wylosowano 3 miejsca).

## Dyskusja

Wiele z przyczyn powstawania zanieczyszczenia sztucznym światłem w nocy zostało już rozpoznanych. Badanie stopnia oddziaływań na poszczególne grupy organizmów czy ekosystemy, a także badanie skutków, do jakich prowadzi długie narażenie na sztuczne światło w nocy i wzrost czasu ekspozycji na światło, ciągle jest potrzebne – zarówno w celu ochrony środowiska, jak i zdrowia człowieka.



Ryc. 5. Porównanie współczynnika nachylenia prostej wylosowanych punktów dla gmin miejskich oraz wiejskich w województwie wielkopolskim (lata 1992–2013).

Badania takie jak zaprezentowano w niniejszym rozdziale, polegające na rozpoznaniu w jakich miejscach światło sztuczne oddziałuje najbardziej i gdzie wzrost natężenia jest największy, mogą stanowić pomoc przy podejmowaniu decyzji, w których obszarach należy najpierw wprowadzać środki zaradcze ograniczające wpływ światła nocnego. Takimi środkami może być stosowanie lamp ulicznych o odpowiedniej konstrukcji, optymalne ich zagęszczenie, czy próbę utworzenia większej liczby Parków Ciemnego Nieba. Stosując odpowiednie rozwiązania można pogodzić rozwój miast i wsi z przynajmniej częściową ochroną ciemnego nieba. Ochrona ciemnego nieba może przynieść korzyści całemu społeczeństwu oraz środowisku przyrodniczemu i dlatego

potrzebne są odpowiednie akty prawne związane z planowaniem i zagospodarowaniem przestrzennym, a także w zakresie prawa budowlanego i drogowego. Wymagania ograniczania sztucznego światła zebrane są w czterech głównych normach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, i dotyczą oświetlenia drogowego, obiektów sportowych, miejsc pracy na zewnątrz i wewnątrz (Sielachowska i Zajkowski 2018). Informacje w tym zakresie można również znaleźć w Raportach Technicznych Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej CIE. W raporcie z 2017 roku uwzględniono m.in. niepożądane skutki intensywnego wzrostu natężenia światła, przedstawiono również dopuszczalne wartości natężenia sztucznego światła w zależności od miejsca (CIE 150:2017). Potrzebne jest jasne zdefiniowanie nowego rodzaju zanieczyszczenia, wskazanie jego źródeł i niezbędnych ograniczeń w świetle prawa (Szlachetko i Zielińska-Dąbkowska 2021). Ustawa *Prawo ochrony środowiska* z dnia 27 kwietnia 2001 roku nie przewiduje tego rodzaju zanieczyszczenia oraz jego emisji (Dz.U. z 2022 r. poz. 2556, 2687, z 2023 r. poz. 877. Ustawa *Prawo ochrony środowiska* z dnia 27 kwietnia 2001 r.).

Intensyfikacja natężenia światłem sztucznym w nocy obserwowana jest szczególnie na obrzeżach większych miast, a także w mniejszych miastach. Jest to spowodowane intensywnym rozwojem mniejszych miejscowości. W Poznaniu oraz Koninie tendencję wzrostową zaobserwowano najbardziej w kierunku południowo-zachodnim. W przypadku Poznania czynnikiem ograniczającym wzrost natężenia w kierunku północnym są rozległe tereny wojskowe – poligon Biedrusko i znajdujące się na nich lasy Nadleśnictwa Łopuchówko oraz Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka. Źródłem światła sztucznego może być infrastruktura: drogowa, kolejowa, lotniskowa oraz związany z nią ruch komunikacyjny, a także wszelkiego rodzaju zabudowa – mieszkalna, przemysłowa i handlowa. Wyższe wartości natężenia światła wiążą się z zagęszczeniem tych źródeł, a także z rozwojem mniejszych miejscowości, położonych blisko dużych miast. Jednak i ta tendencja ulega zmianie, coraz wyższe wartości natężenia światła zauważalne są w większości mniejszych miast oraz niektórych wsi i często nie jest to związane z odległością od większych miast. Przykładowo, w badanym okresie większą zmianę natężenia światła zaobserwowano w Złotowie w północnej części województwa, niż w oddalonej od niego o około 30 kilometrów zdecydowanie większej Pile, byłym mieście wojewódzkim.

Większość gmin miejskich o wysokiej zmianie nie należy do tych, których liczba mieszkańców wynosi powyżej 50 tysięcy. Wyjątek stanowi Konin oraz obrzeża Poznania. Przedstawiona w tym rozdziale mapa (zobacz ryc. 3) zmian natężenia światła pozwala dość dokładnie określić obszar (o wielkości

przestrzennej piksela około 1 km<sup>2</sup>), w którym nastąpiły zmiany. Dzięki temu można je przypisać czasami nawet do powstających konkretnych osiedli, czy zespołów dużych obiektów przemysłowych. Mimo, że prawie w całym województwie odnotowano wzrost natężenia światła, można znaleźć jeszcze miejsca, gdzie wartości natężenia światła były bliskie 0. Trzeba podkreślić, że należałoby jeszcze dokonać obliczeń na nowszych danych z ostatnich lat, co pozwoli oszacować obecny zasięg obszarów ze wzrostem natężenia światła. Sielachowska i Zajkowski (2019) porównali natężenie światła w Białymstoku oraz w oddalonym o około 30 kilometrów Tykocinie w województwie podlaskim. Wyższe wartości zanieczyszczenia światła obserwowano w centrum Białegostoku, którego liczba mieszkańców w 2017 roku wynosiła około 297 100. Niebo nad tym miastem można było zaklasyfikować do klasy 7. według skali Bortle'a, opisywanej jako niebo przejściowe, znajdujące się między podmiejskim a typowo miejskim nieboskłonem. Niebo nad okolicami niewielkiego miasta Tykocin, liczącego w 2017 roku około 2 000 mieszkańców zaklasyfikowano do klasy 2. według Bortle'a, jako typowe ciemne niebo (Sielachowska i Zajkowski 2019). Podobną zależność zauważyć można także w miastach województwa wielkopolskiego i okolicznych mniejszych miejscowościach, wartości natężenia światła zmniejszały się wraz z odległością od centrów tych miast. Jednakże obszar pod wpływem wysokich wartości natężenia światła sztucznego jest coraz większy. Na peryferiach głównych miast oraz w gminach przyległych wzrost natężenia światła był największy, co wskazuje na szybszy rozwój okolicznych miejscowości poza granicami dużych miast, tak jak na przykład okolice Poznania. Tendencja rozwoju centrów miast i niższe wartości zmian poza ich granicami jest charakterystyczna dla mniejszych miejskich obszarów, czego przykładem może być Złotów, Śrem, Gostyń czy Turek. Z kolei niewielkie wartości natężenia światła w województwie wielkopolskim dotyczyły głównie terenów leśnych. Po przeprowadzaniu badań jasności nocnego nieba w Polsce w latach 1994–2009 Ścieżor (2014) potwierdził zależność między jasnością sztucznej poświaty i jej intensywnością, a wielkością miast i poziomem industrializacji. Dodatkowo nie zauważył znaczącej zmiany jasności nieba w centralnych częściach miast, natomiast dużą zmianą charakteryzowały się szybko rozwijające się peryferie największych miast, takich jak Kraków czy Warszawa, co można potwierdzić w przypadku Poznania na podstawie przedstawionych w tej pracy analiz. Dużą tendencję wzrostową zanieczyszczenia światłem, widoczną bardziej, niż w Europie, opisano w Ameryce Południowej, w której intensywny wzrost oświetlenia w miastach związany był z ich niekontrolowanym rozwojem oraz brakiem odpowiednich regulacji prawnych (Mu i in. 2021). Ci sami autorzy podkreślają również rosnące zagrożenie dla terenów chronionych w Chinach.

Jiang i in. (2017) podają Hong Kong, jako miasto o spadkowej tendencji natężenia światła w wyniku wprowadzenia polityki, mającej na celu zmniejszenie ilości emitowanego oświetlenia powodującego zanieczyszczenie. Wymienieni badacze zaobserwowali w latach 1992–2018 tendencję wzrostową na terenie całych Chin, co było spowodowane nieodpowiednią polityką, prowadzącą do wzrostu urbanizacji, wysokiego zużycia energii i powstania tak zwanych „bezsennych miast”, w których ilość sztucznego światła w nocy jest bardzo wysoka. Mimo to, zauważono również na niektórych obszarach tendencję spadkową, wynikającą głównie z opuszczania obszarów wydobywczych lub budowlanych. Po wyeksploatowaniu zasobów czy ukończenia budowy, zmniejszeniu uległy źródła sztucznego światła, takie jak ostre oświetlenie związane z działalnością gospodarczą, a w przypadku wydobycia złóż – zjawisko spalania gazu (Jiang i in. 2017).

Ilość i rodzaj źródeł sztucznego światła na świecie zmienił się, a także powiększeniu uległo terytorium, na którym występuje ten typ zanieczyszczenia. Dokładność prezentowanych w tej pracy danych oraz duża rozpiętość czasowa umożliwia ocenę zanieczyszczenia światłem sztucznym w skali lokalnej i globalnej (Li i in. 2020). Powoli zwiększa się również świadomość społeczeństwa, dlatego istotne jest, by informacje dotyczące możliwości ograniczania natężenia światła były ogólnodostępne i w zasięgu większości ludzi. Poza wdrażaniem kolejnych zaleceń, czy obowiązków i ograniczeń prawnych w zakresie oświetlenia, ważne jest egzekwowanie ich przez organy, które są lub będą za to odpowiedzialne. Ważnym, choć często pomijanym aspektem, jest odpowiednia edukacja i działania na rzecz wzrostu świadomości, zwłaszcza wśród młodego pokolenia. Co roku na świecie poziom natężenia światła wzrasta średnio o 6%. W Stanach Zjednoczonych 80%, a w Europie 67% populacji mieszka na obszarach, których nocne niebo nigdy nie jest ciemniejsze, niż przy księżycu świecącym w pełni (Sala 2020). W Polsce na przełomie XX i XXI wieku w ciągu 10 lat obszar zanieczyszczony sztucznym światłem w nocy zwiększył się o 20% całkowitej powierzchni kraju (Kołomański i in. 2019). Szacuje się, że 51% europejskich obszarów chronionych jest narażonych na działanie sztucznego światła (Mu i in. 2021). Badanie tendencji zmian na określonym obszarze i przedziale czasowym dzięki systematycznemu zbieraniu danych satelitarnych pozwala na ustalenie możliwego wzorca zmian, jakim charakteryzują się wybrane miasta, czy obszary, a w konsekwencji ich stopnia rozwoju. Możliwe jest również określenie poziomu zagrożenia, jakie stwarza nadmierna emisja światła, jakie są tendencje zmian natężenia światła, a zatem też łatwiej określić sposoby ograniczania tej emisji lub ograniczania jej wpływu na człowieka i środowisko przyrodnicze.

## Podsumowanie

W pracy przeanalizowano zmiany, jakie zaszły w natężeniu sztucznego światła w województwie wielkopolskim w okresie intensywnego rozwoju Polski (1992–2013). Największe zmiany odnotowano na peryferiach dużych miast, a szczególnie w gminach zlokalizowanych pod Poznaniem. Choć w niektórych gminach wiejskich wzrost natężenia światłem był większy niż w miastach, to biorąc pod uwagę wszystkie obszary miejskie i wiejskie, istotnie statystycznie większy wzrost natężenia światła wystąpił w miastach. Najniższe wartości zmian są ograniczone jedynie do zwartych terenów leśnych o większej powierzchni, a także centrum Poznania. Planowana jest kontynuacja przedstawionych badań dla obszaru całej Polski i dla dłuższego przedziału czasowego, tj. od 1992 roku do 2022 roku, czyli okresu czterech pełnych dekad, co pozwoli na zdobycie bardziej przekrojowych i aktualnych informacji. Będzie to jednak działanie bardziej wymagające i skomplikowane ze względu na różnice w sposobie pozyskiwania danych źródłowych począwszy od 2014 roku.

## Literatura

- Bała D., 2018. Organizacja i funkcjonowanie grup producentów rolnych w województwie wielkopolskim. *Rozprawa doktorska*. <https://repozytorium.amu.edu.pl/handle/>. (dostęp: 29.06.2023).
- Bird S, Parker J., 2014. Low levels of light pollution may block the ability of male glowworms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females. *Journal of Insect Conservation* 18(4): 737–743.
- Bortle J.E., 2001. Introducing the Bortle Dark-Sky Scale. *Sky and Telescope* 2: 126–129.
- GEE 2022. DMSP OLS: *Nighttime Lights Time Series Version 4, Defense Meteorological Program Operational Linescan System*. Opis danych, strona: [https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/NOAA\\_DMSPOL\\_S\\_NIGHTTIME\\_LIGHTS#bands](https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/NOAA_DMSPOL_S_NIGHTTIME_LIGHTS#bands) (dostęp: 01.07.2023).
- Główny Urząd Statystyczny, 2021. *Ludność. Stan i struktura oraz ruch naturalny w przekroju terytorialnym w 2020 roku*, Warszawa.
- Jiang W., He G., Long T., Wang C., Ni Y., Ma R., 2017. Assessing Light Pollution in China Based on Nighttime Light Imagery. *Remote Sensing* 9(2): 135.
- Kołomański S., 2014. Zanieczyszczenie światłem i ciemność. *Prace i Studia Geograficzne* 53: 29–46.
- Mu H., Li X., Du X., Huang J., Su W., Hu T., Wen Y., Yin P., Han Y., Xue F., 2021. Evaluation of Light Pollution in Global Protected Areas from 1992 to 2018. *Remote Sensing* 13(9): 1849.
- Nawalkowski P., 2022. <https://ciemnieniebo.pl/pl/zanieczyszczenie-sztucznym-swiatlem> (dostęp: 29.06.2023).
- Raport o stanie środowiska w Wielkopolsce w latach 2013–2015*, 2016. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Poznaniu (dostęp: 02.07.2023).



- Rocznik Statystyczny Leśnictwa*, 2020. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa (dostęp: 01.07.2023).
- Sala K., 2020. Zanieczyszczenie świetlne. Zagrożenia i sposoby jego ograniczania. *Roczniki Administracji Publicznej* (6): 254–266.
- Salmon M., Tolbert M.G., Painter D.P., Goff M., Reiners R., 1995. Behavior of Loggerhead Sea Turtles on an Urban Beach. II. Hatchling Orientation. *Journal of Herpetology* 29(4): 568–576.
- Sielachowska M., Zajkowski M., 2018. Szacowanie zanieczyszczenia światłem od obiektów sportowych za pomocą oprogramowania symulacyjnego Dialux. *Poznan University of Technology Academic Journals* 96: 219–229.
- Sielachowska M., Zajkowski M., 2019. Porównanie poziomu zanieczyszczenia światłem obszarów o różnym zaludnieniu na podstawie pomiarów natężenia oświetlenia i obserwacji tarczy Księżycy. [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 137–152.
- Szlachetko K., Zielińska-Dąbkowska K.M., 2021. O (bez)skuteczności prawa polskiego wobec antropogenicznych zanieczyszczeń światłem sztucznym. *Przegląd Prawa Publicznego* 5: 22–39.
- Ścieżor T., 2014. Określenie charakteru zmian jasności nocnego nieba w Polsce w latach 1994–2009 na podstawie amatorskich obserwacji komet. *Prace i Studia Geograficzne* 53: 61–79.
- Tańda J., 2015. Ekologiczne zanieczyszczenie światłem, czyli kiedy sztuczne światło w nocy zaburza naturalny cykl światła i ciemności w ekosystemie. *Kosmos. Seria A, Biologia* 64(4): 611–616.
- Ustawa Prawo ochrony środowiska* z dnia 27 kwietnia 2001 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2556, 2687, z 2023 r. poz. 877.
- Verheijen F.J., 1985. Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with. Incidents, causation, remedies. *Experimental Biology* 44(1):1–18.
- Xuecao L., Zhou Y., Zhao M., Zhao X., 2020. A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018. *Scientific Data* 7: 1–9.

## Streszczenie

Nadmierna emisja sztucznego światła nocą to nowy rodzaj zanieczyszczenia. Szybkie rozpowszechnienie sprawiło, że dotyka ona około 90% ludności Stanów Zjednoczonych oraz 67% Europy. Zmienia przebieg procesów metabolicznych flory, procesów życiowych fauny, a także wpływa na zdrowie i samopoczucie ludzi. Ten rodzaj zanieczyszczenia utrudnia, a czasem uniemożliwia obserwacje astronomiczne. Szkodliwość skutków porównuje się do tych, które powodowane są przez inne źródła zanieczyszczeń. Ważny jest ciągły monitoring rozpowszechnienia tego zanieczyszczenia oraz jego skutków. Celem pracy było zbadanie w których obszarach miejskich i wiejskich województwa wielkopolskiego w latach 1992–2013 poziom natężenia światła znacząco wzrósł, a w których był znikomy. Wykorzystano do tego program R Studio, jako środowisko do analiz statystycznych oraz aplikację ArcGIS (Esri) służącą do analizy danych przestrzennych i do wizualizacji wyników w postaci map tematycznych. Najbardziej wyraźną tendencję wzrostową zanieczyszczenia światłem zarejestrowano wśród gmin otaczających Poznań: Komorniki, Tarnowo Podgórne, Luboń oraz w Koninie. Także w mniejszych miastach i ich najbliższym otoczeniu na terenie całego województwa odnotowano wyraźną tendencję wzrostową, np. w Złotowie, Śremie, Gostyniu, Jarocinie, Grodzisku Wielkopolskim, Wrześni, Słupcy i Turku. Najmniej pod względem poziomu natężenia światła w badanym okresie zmieniły się zwarte tereny leśne oraz centrum Poznania.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, sztuczne światło, ciemne niebo, zmiany czasowe.

## **Trends in artificial light pollution changes at night in Wielkopolska (1992–2013)**

### **Summary**

The excessive emission of artificial light is a new type of pollution. It affects about 90% of the population of the United States of America and 67% of European, changing course of flora's metabolic processes and fauna's life processes. It also has a big impact on people's health and comfort. This kind of contamination impedes and sometimes makes an astronomic observations impossible. Consequences are told to be as harmful as other sources of pollution. It is important to continuously monitor the prevalence of this pollution and its effects. The aim of this work was to find out in which urban and rural areas in Greater Poland Voivodeship from 1992 to 2013 the light intensity level has risen or was insignificant. R Studio was used as an environment for statistical analysis and ArcMap, which enables editing and analyze spatial data, needed to visualize in a form of a map. The strongest rising tendency was observed in districts surrounding Poznań: Komorniki, Tarnowo Podgórne, Luboń and also in Konin. The distinct rising tendency was also observed in smaller towns (and their close proximity) in Voivodeship, for example: Złotów, Śrem, Gostyń, Jarocin, Grodzisk Wielkopolski, Września, Słupca, Turek. The smallest and insignificant changed were recorded in forested areas and also in the Poznań city centre.

**Key words:** light pollution, artificial light, dark sky, temporal changes.

### **Dane kontaktowe autorów:**

#### **Wiktoria Kocięda**

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
Wydział Biologii  
e-mail: wikkoc@st.amu.edu.pl

#### **Paweł Bogawski**

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
Wydział Biologii  
e-mail: bogawski@amu.edu.pl

**Tomasz Ścieżor**

## **Zanieczyszczenie świetlne na obszarze Parku Krajobrazowego Beskidu Małego**

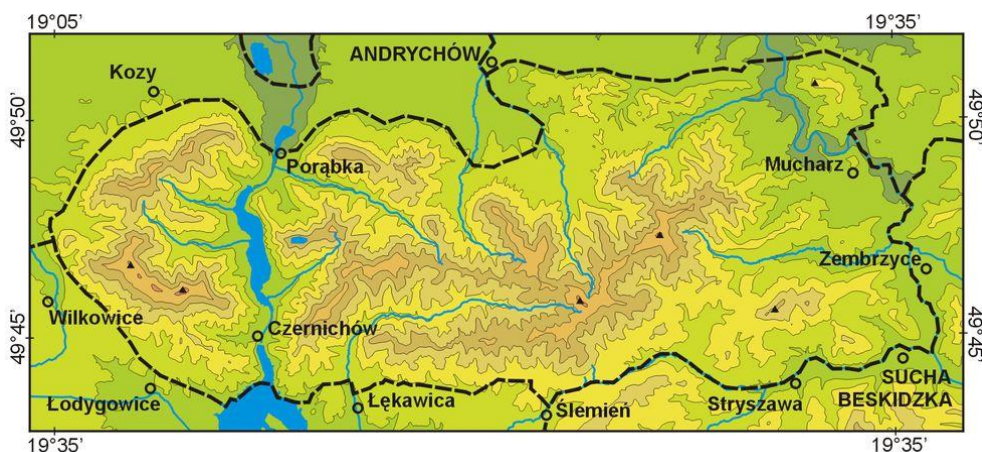
### **Wprowadzenie**

Problem wpływu niewłaściwego nocnego oświetlenia na środowisko naturalne, czyli tzw. zanieczyszczenie światłem (lub zanieczyszczenie świetlne) (ang. *light pollution*), był wielokrotnie poruszany w literaturze (Rich i Longcore 2006; Stone i in. 2009; Gaston i in. 2012; Lacoeyuilhe i in. 2014; Stone i in. 2015; Marcinkowska i Tęgowska 2015; Tałanda 2015). W szczególności, rozważano wpływ jasno oświetlonych ośrodków miejskich na ich bliższe bądź dalsze okolice (Walker 1977). Światło pochodzące z tych ośrodków, w przypadku nieba bezchmurnego rozprasza się na różnego rodzaju aerozolah atmosferycznych (Ścieżor i Czaplicka 2020) lub odbija się od chmur (Ścieżor 2020), w obu przypadkach docierając do obszarów teoretycznie wolnych od bezpośredniego wpływu oświetlenia sztucznego na znajdujące się tam ekosystemy. Tę formę zanieczyszczenia świetlnego określa się zwykle jako sztuczną poświatę niebieską (ang. *artificial sky glow*). O ile parki narodowe lokalizowane są zazwyczaj na tyle daleko od dużych ośrodków miejskich, że wpływ ich światła rozproszonego w atmosferze można uznać za zaniedbywalny (Ścieżor 2021), o tyle innego rodzaju obszary chronione, jak np. parki krajobrazowe, rezerваты przyrody czy obszary Natura 2000, stanowiące również siedlisko cennych przyrodniczo gatunków zwierząt i roślin, często wręcz zawierają w swoim obrębie jasno oświetlone miejscowości, bądź nawet sąsiadują z dużymi miastami. Temat zanieczyszczenia świetlnego tego typu obszarów chronionych, jak dotąd w Polsce nie zauważany, wymaga niewątpliwie starannych badań.

W ramach badań prowadzonych przez Pracownię Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego działającą na Politechnice Krakowskiej, podjęto wyżej przedstawiony temat, jako przedmiot analizy wybierając obszar objęty przez Park Krajobrazowy Beskidu Małego.

## Obszar badań

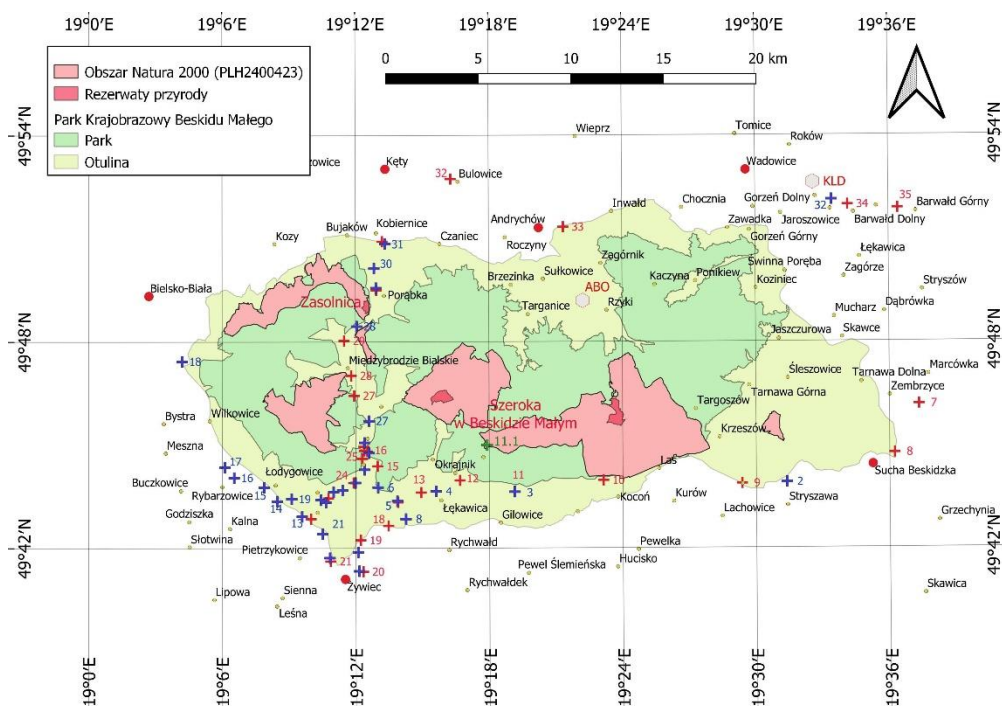
Beskid Mały jest pasmem górskim w Polsce, stanowiącym część Beskidów Zachodnich (ryc. 1). Rozciąga się na długości około 35 km i szerokości 10–15 km. Pasma to graniczy z Bramą Wilkowicką, Beskidem Makowskim, Kotliną Żywiecką, Pogórzem Wielickim, Pogórzem Śląskim. Od północy z Beskidem Małym graniczą cztery miasta: Bielsko-Biała (168 tys.), Kęty (18 tys.), Andrychów (20 tys.) i Wadowice (17 tys.); od południa Żywiec (30 tys.) i Sucha Beskidzka (9 tys.). Jest to niewielkie powierzchniowo (jedynie około 7 000 ha, stąd jego nazwa), ale zwarte pasmo górskie. Najwyższym szczytem jest Czupel (930 m).



Ryc. 1. Granice pasma Beskidu Małego (Mapa 2006).

Cały obszar Beskidu Małego stanowi Park Krajobrazowy Beskidu Małego (PKBM), będący jednocześnie obszarem Natura 2000 (PLH 2400423) (Rozporządzenie 2022) (ryc. 2). W jego obrębie znajdują się trzy rezerwy przyrody: Zaslonica (w pobliżu Jeziora Czanieckiego), Szeroka w Beskidzie Małym (w pobliżu Międzybrodzia Żywieckiego) oraz Madohora (na południe od Andrychowa). Projektowane są także następne rezerwy: na Żurawnicy, Łysinie, Leskowcu i w dolinie potoku Dusica. Jako pomniki przyrody chronione są liczne drzewa i parki. Zagrożeniem dla regionu są zanieczyszczone masy powietrza przynieszone przez zachodnie wiatry z Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. PKBM podzielony jest na część małopolską i śląską. Największą powierzchnię w obrębie części małopolskiej zajmują lasy (82%), następnie

grunty orne (12%) oraz łąki i pastwiska (3%) (Uchwała 2020). Pozostałe 3% zajmuje zabudowa, drogi i wody. Dominuje typ krajobrazu zbliżony do naturalnego, który zajmuje około 86% powierzchni. W dalszej kolejności występuje krajobraz naturalno-kulturowy (około 13% powierzchni) i kulturowy (około 1% powierzchni). W obrębie PKBM znajdują się cztery wsie (Kaczyna, Targoszów, Kocierz Rychwałdzki i Łysina) oraz pięć przysiółków pobliskich miast: Bielska Białej (Pod Lasem, Mała Straconka, Do Chrobaków i Do Polaków) i Żywca (Pyrlówka). W obrębie otuliny PKBM znajduje się 27 wsi oraz 43 przysiółki i osiedla mieszkaniowe okolicznych miast (Andrychów: 2, Bielsko-Biała: 6, Sucha Beskidzka: 27 oraz Żywiec: 8).



Ryc. 2. Formy ochrony przyrody na obszarze Parku Krajobrazowego Beskidu Małego (wykonał autor publikacji na podstawie danych GIS). Zaznaczono punkty pomiarowe SQM przy niebie bezchmurnym (czerwone), całkowicie zachmurzonym (niebieskie), pojedynczy pomiar w głębi PKBM (zielony) oraz położenie stacjonarnych stacji pomiarowych ABO i KLD.

W wyniku działalności człowieka przyroda została silnie przekształcona. Obszary leśne to obszary typu dolnoreglowego. Wyjątkiem są szczytowe partie Łamanej Skały, gdzie występuje naturalny, porośnięty świerkiem regiel górny. Przyczyną jest podłoże, bardzo tutaj skaliste i ubogie w glebę. Dawniej przeważały lasy bukowe, zniszczone zostały jednak na skutek wypałów i wyrębów. Obecnie jest to las wtórny, w którym przeważają zespoły świerkowo-

bukowo-jodłowe. Pozostałości pierwotnej buczyny ostały się jeszcze w niektórych miejscach, głównie w obrębie rezerwatów przyrody. Świat zwierząt Beskidu Małego jest stosunkowo skromny, związane jest to z niewielką powierzchnią przy dużym stopniu penetracji jego terenów przez ludzi. Obszary dostępne dla zwierząt powiększają się jednak z powodu zarastania lasem dawnych gospodarstw rolnych, a także dzięki ochronie przyrody i zmniejszonemu zanieczyszczeniu środowiska. Stopniowo powracają do rejonu większe drapieżniki (wilk i ryś), a czasem pojawia się niedźwiedź brunatny. Żyją tu duże ilości zwierzyny płowej, dzików i innych ssaków. Z rzadkich płazów występuje salamandra plamista. Do rejonów o najbogatszej faunie należą rezerваты.

Na terenie PKBM stwierdzono występowanie 44 gatunków chronionych roślin naczyniowych, z których 12 znajduje się na Czerwonej Liście Roślin Naczyniowych w Polsce. Część z nich może być narażona na negatywny wpływ zanieczyszczenia świetlnego, bowiem pod wpływem sztucznego światła zaburzony zostaje ich cykl wzrostu, kwitnienia i owocowania, przez co nie zwabiają owadów w odpowiednim czasie (Zych i Ryniewicz 2019). Światło ma też wpływ na cykl dobowy roślin. W ciągu dnia zachodzi proces fotosyntezy, a w nocy proces ten ustaje, dając roślinie możliwość odpoczynku. Narażone na światło rośliny ciągle zmuszane są do fotosyntezy, co wpływa niekorzystnie na ich wzrost i owocowanie oraz zmniejsza ich odporność na infekcje (Wojciechowska 2019). Na terenie parku stwierdzono również występowanie 135 gatunków rzadkich zwierząt, podlegających ścisłej ochronie gatunkowej, z których aż 21 wpisanych jest do Polskiej Czerwonej Księgi Zwierząt. Wśród nich jest kilkadziesiąt gatunków ptaków (np. puchacz, sóweczka), kilka gatunków nietoperzy (np. nocek rudy) i kilka gatunków płazów (np. kumak górski), które prowadzą nocny tryb życia. Zwierzęta te są szczególnie narażone na oddziaływanie sztucznego oświetlenia w nocy.

## **Metodologia badań**

### **Aparatura pomiarowa**

W ramach prowadzonych badań wykonano pomiary jasności powierzchniowej nocnego nieba przy pomocy mierników Sky Quality Meter (SQM) produkcji firmy Unihedron: przenośnych, typu SQM-L, jak też stacjonarnych, typu SQM-LE (z dostępem zdalnym przez sieć internet) oraz SQM-LU-DL (autonomicznych, zapisujących wyniki pomiarów w pamięci wewnętrznej). Okna pomiarowe mierników skierowane były w kierunku zenitu z dokładnością do około 3°, zbierając światło ze stożka o rozwartości 40°. Mierzona jasność powierzchniowa nocnego nieba (oznaczana jako  $S_a$ ) podawana jest w astronomicznych jednostkach: magnitudo na sekundę łuku do kwadratu (mag/arcsec<sup>2</sup>). Skala ta

określa jasność powierzchniową rozmytych obiektów astronomicznych, takich jak mgławice, galaktyki, komety, czy właśnie tło nieba. Należy pamiętać, że skala  $S_a$  jest logarytmiczna i odwrotna, tzn. wyższe wartości oznaczają mniejszą jasność powierzchniową nieba. W celu umożliwienia oceny mierzonej wielkości przez osoby nie związane z tematyką zanieczyszczenia świetlnego, zgodnie ze specyfikacją producenta mierników możliwe jest skorelowanie skali  $S_a$  z liniową i prostą skalą luminancji ( $L$ ). W układzie SI jednostką luminancji jest kandela na metr kwadratowy ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) czy (w przypadku niskiej jej wartości) jej jednostka pochodna milikandela na metr kwadratowy ( $\text{mcd}/\text{m}^2$ ). W niniejszej pracy, niezależnie od mierzonej wartości  $S_a$ , podawane są również odpowiednie wartości luminancji w tych właśnie jednostkach (Ścieżor 2018).

Dokładność pomiaru przy pomocy mierników SQM, podana przez producenta, wynosi  $0,1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ , jednak wielokrotne pomiary pozwoliły stwierdzić, że amplituda zmian wartości  $S_a$  w każdym badanym egzemplarzu miernika w stabilnych warunkach atmosferycznych nie przekracza  $0,02 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ . W związku z tym pomiar wyzwalano dotąd, dopóki trzy kolejne odczyty nie były wzajemnie zgodne z dokładnością  $0,02 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$  i w tym czasie nie obserwowano jakiegokolwiek trendu zmian. Wartości  $S_a$  podane w niniejszej pracy zaokrąglone są do  $0,1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ .

### **Pomiary terenowe**

W obrębie Parku Krajobrazowego Beskidu Małego, jego otuliny oraz najbliższej okolicy (do 5 km od krawędzi otuliny PKBM) wykonano pomiary jasności łuny świetlnej nocnego nieba w ponad 30 punktach pomiarowych: 28 przy niebie bezchmurnym i bezksiężycowym (w drugiej połowie stycznia 2018) i 30 przy niebie całkowicie zachmurzonym niskimi chmurami (w pierwszej połowie marca 2019). Okres wykonywania pomiarów ustalony był tak, aby czas trwania nocy astronomicznej pozwalał na zdążenie objęcia badaniami całego obszaru PKBM przy tych samych warunkach naturalnego oświetlenia nieba. Pomiary rozpoczynano po upływie dwóch godzin od zachodu słońca, kończono około północy.

Wybór miejsc pomiarowych podyktowany był przede wszystkim tym, aby w polu widzenia miernika nie znalazła się żadna przeszkoda lub źródło światła sztucznego. Wymuszało to wykonywanie pomiarów na bocznych drogach, z dala od oświetlenia drogowego. W związku z koniecznością poruszania się samochodem w porze nocnej dostępne były jedynie te obszary PKBM i jego otuliny, do których możliwy był dojazd. Punkty starano się ustalać w miarę równomiernie, jednak wymienione czynniki sprawiały, że odległości między nimi mieściły się w zakresie od 1 do 4 km.

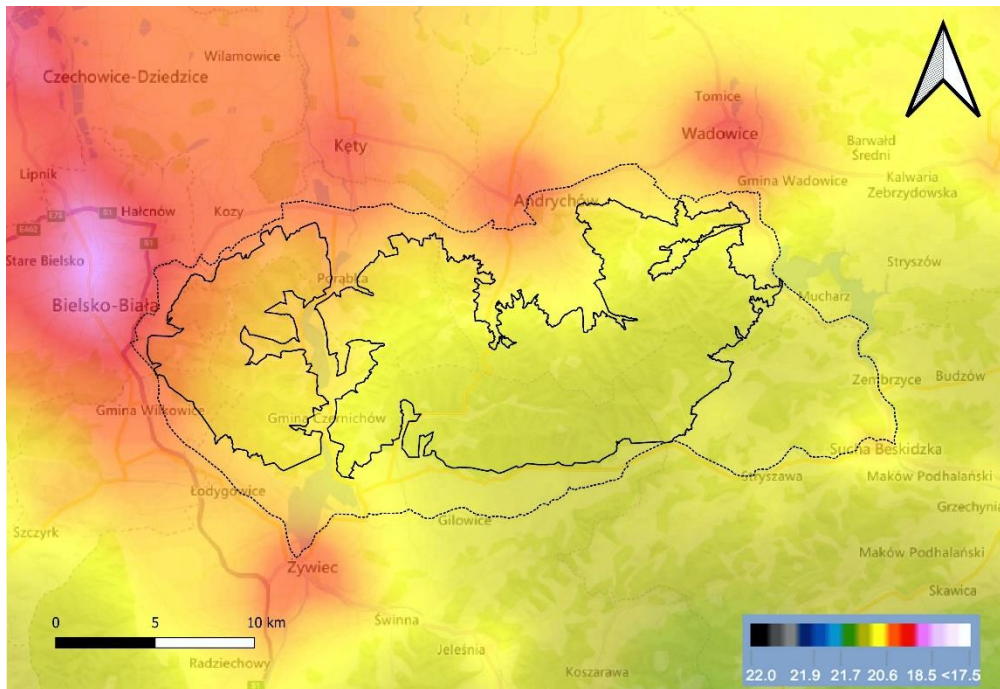


W bieżącym roku zarówno na obszarze otuliny PKBM (stacja ABO niedaleko Andrychowa), jak też w jej pobliżu (stacja KLD niedaleko Wadowic) ustawiono dwie stacjonarne stacje pomiarowe, wykorzystujące mierniki SQM-LE (ABO) i SQM-LU-DL (KLD). Mierniki te automatycznie wykonują pomiar jasności łuny świetlnej co 5 (ABO) lub co 10 minut (KLD).

### **Analiza poziomu zanieczyszczenia świetlnego na badanym obszarze**

#### **Mapa modelowa zanieczyszczenia świetlnego**

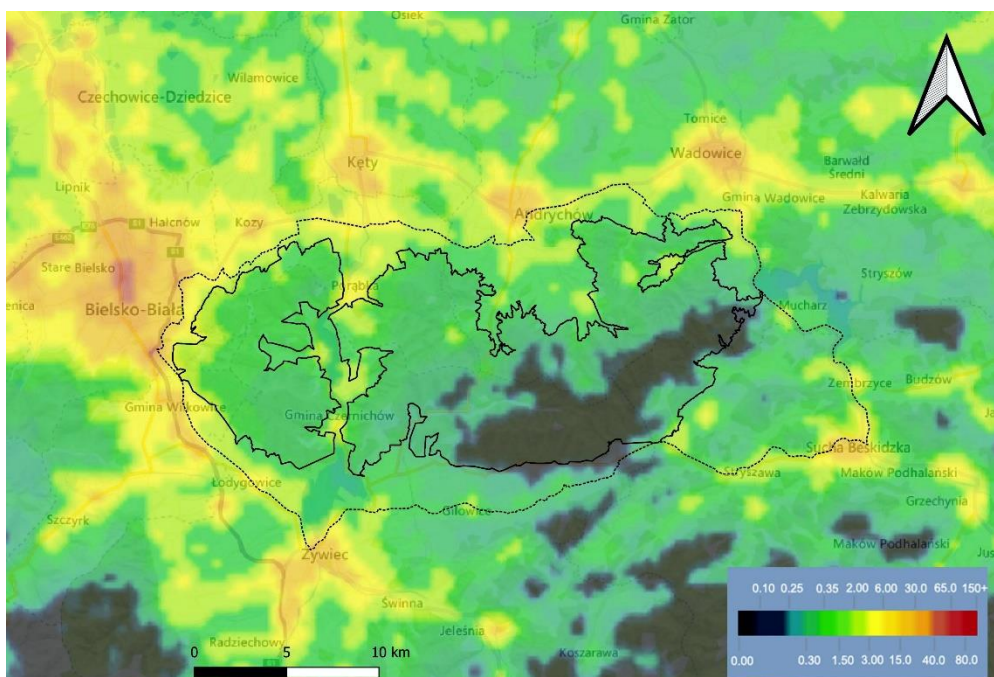
W 2016 roku opublikowano modelowy atlas przewidywanej jasności sztucznej łuny świetlnej nocnego nieba (Falchi i in. 2016). Do stworzenia tego atlasu wykorzystano nocne zdjęcia satelitarne wysokiej rozdzielczości oraz istniejące modele propagacji światła w atmosferze i jego rozpraszania na aerozolah atmosferycznych. W ten sposób otrzymano model rozkładu jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba dla całej kuli ziemskiej.



nieba, co oznacza, że na tych terenach jest wyższy poziom zanieczyszczenia świetlnego w formie sztucznej poświaty niebieskiej. Zielony i żółty odcień oznaczają mniejszy poziom tego zjawiska. Zgodnie z mapą, na badanym obszarze jasność powierzchniowa nocnego nieba mieści się w zakresie  $20,05 \div 21,24 \text{ mag/arcsec}^2$ , co odpowiada zakresowi luminancji od  $1,04$  do  $0,35 \text{ mcd/m}^2$ .

### Satelitarna mapa radiancji

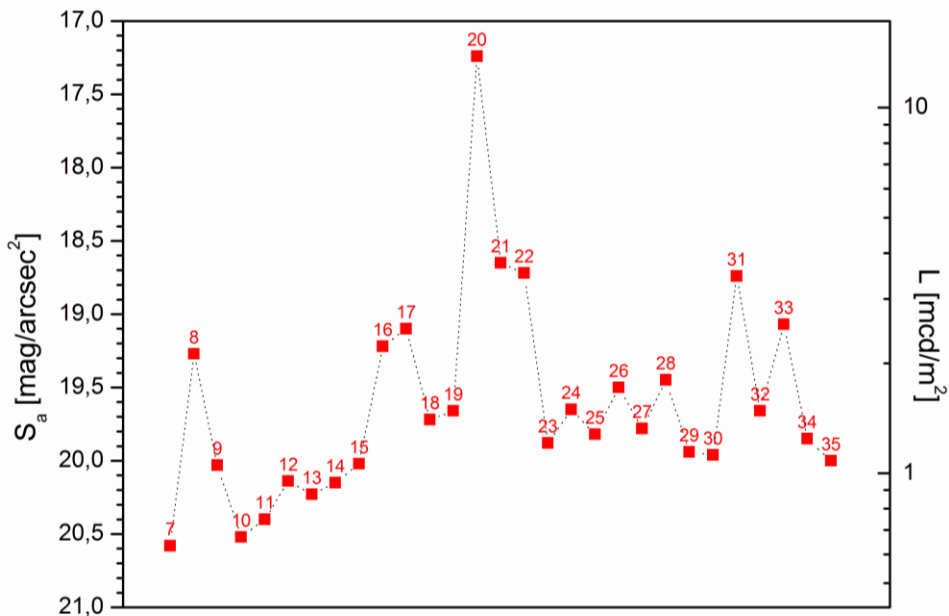
Mapę radiancji opracowano na podstawie zdjęć uzyskanych przy pomocy specjalizowanej kamery VIIRS/DNB umieszczonej na pokładzie satelity Suomi NPP wystrzelonego w 2011 r. (Stare 2023). Rozdzielczość zdjęć umożliwia rozróżnienie obiektów o rozmiarach poniżej 1 km. Mapa VIIRS pokazuje rozkład radiancji, czyli natężenia światła emitowanego w zenit z danego terenu. Nie jest to więc mapa zanieczyszczenia świetlnego, jednak pomaga przy identyfikacji jego źródeł. W 2022 roku radiancja z większości obszaru PKBM i jego otuliny mieściła się w przedziale  $0,00 \div 0,70 \cdot 10^{-9} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr}$ . Na załączonej mapie (ryc. 4) wartościom tym odpowiada kolor zielony oraz zielono-żółty. Wartości wyższe, od  $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr}$  (kolor żółty) do około  $20,0 \cdot 10^{-9} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr}$  (kolor pomarańczowy), dotyczą większych miejscowości, takich jak peryferyjne dzielnice Bielska-Białej, Żywca, Andrychowa czy Suchoj Beskidzkiej.



Ryc. 4. Satelitarna mapa radiancji w 2022 r. z obszaru Parku Krajobrazowego Beskidu Małego (linia czarna ciągła) i jego otuliny (linia czarna punktowana). Skala wyrażona w jednostkach  $10^{-9} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr}$  (na podkładzie mapy Stare (2023)).

## Badania własne

Pomiary wartości  $S_a$  wykonane w ramach przejazdów samochodowych w obrębie otuliny PKBM wykazały, że w przypadku nieba bezchmurnego (czerwone krzyżyki na ryc. 2) zmienia się ona na tym obszarze od 20,5 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=0,69$  mcd/m<sup>2</sup>) (punkt nr 10: granica między PKBM i jego otuliną w części SE) do 18,7 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=3,61$  mcd/m<sup>2</sup>) (punkt nr 21: granica otuliny PKBM w pobliżu Żywca) (ryc. 5). W ramach tego objazdu najwyższą wartość  $S_a$ , równą 17,2 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=14,3$  mcd/m<sup>2</sup>) stwierdzono na granicy Żywca (punkt nr 20). Mediana  $S_a$  na całej trasie pomiarowej wynosiła 19,8 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=1,31$  mcd/m<sup>2</sup>).

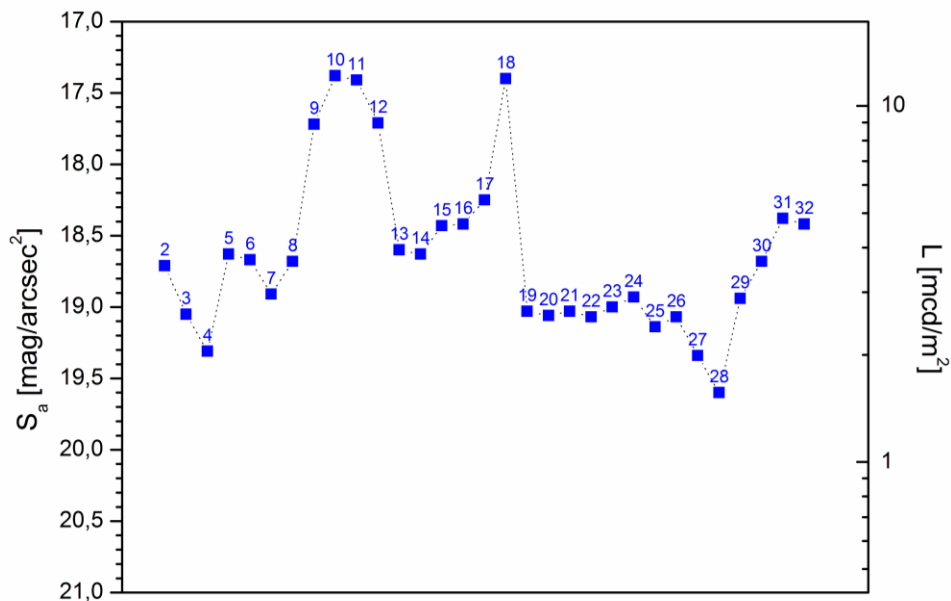


Ryc. 5. Wartości jasności powierzchniowej ( $S_a$ ) i odpowiadającej jej luminancji ( $L$ ) nocnego, bezchmurnego i bezksiężycowego nieba w kolejnych punktach trasy objazdowej otuliny Parku Krajobrazowego Beskidu Małego.

Analogiczne pomiary  $S_a$ , wykonane w warunkach nieba zachmurzonego niskimi chmurami o wysokim albedo (niebieskie krzyżyki na ryc. 2) wykazały, że zmienia się ona od 19,6 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=1,57$  mcd/m<sup>2</sup>) (punkt nr 28: granica między PKBM i jego otuliną w dolinie Soły) do 17,4 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=11,94$  mcd/m<sup>2</sup>) (punkt nr 18: granica otuliny PKBM w pobliżu Bielska-Białej; punkt nr 11: granica otuliny PKBM w pobliżu Żywca) (ryc. 6). Są to jednocześnie punkty o najwyższej wartości  $S_a$  na całej trasie pomiarowej. Mediana  $S_a$  wynosiła w tym przypadku 18,7 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=3,61$  mcd/m<sup>2</sup>).

Oczywiście, pomiary przeprowadzone w czasie przejazdów obarczone są błędem braku powtarzalności. Na mierzone wartości  $S_a$  wpływ mogło mieć

szereg czynników „chwilowych”. W celu weryfikacji otrzymanych wyników dokonano analizy danych pozyskanych ze stacjonarnych stacji pomiarowych: ABO, w głębi otuliny PKBM na południe od Andrychowa oraz KLD, w pobliżu północno-wschodniej krawędzi otuliny na wschód od Wadowic.



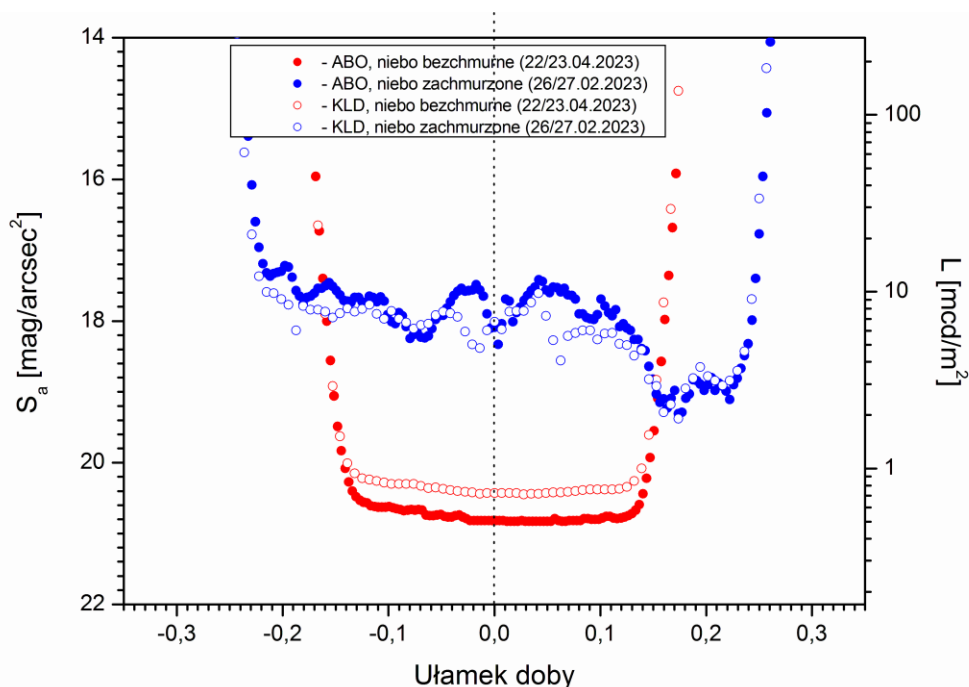
Ryc. 6. Wartości jasności powierzchniowej ( $S_a$ ) i odpowiadającej jej luminancji ( $L$ ) nocnego, całkowicie zachmurzonego nieba w kolejnych punktach trasy objazdowej otuliny Parku Krajobrazowego Beskidu Małego.

W przypadku stacji ABO maksymalna zmierzona wartość  $S_a$  (oznaczająca najciemniejsze, bezchmurne niebo) wynosiła 21,0 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=0,43$  mcd/m<sup>2</sup>), natomiast minimalna (oznaczająca najjaśniejsze, zachmurzone niebo) wynosiła 15,5 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=68,73$  mcd/m<sup>2</sup>) (ryc.7).

W przypadku stacji KLD zmierzone wartości  $S_a$  wynosiły odpowiednio 20,6 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=0,63$  mcd/m<sup>2</sup>) i 16,7 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=22,76$  mcd/m<sup>2</sup>) (ryc. 7).

## Dyskusja

Położenie Parku Krajobrazowego Beskidu Małego sprawia, że jest on bardzo interesującym obiektem, podatnym na zanieczyszczenie świetlne w formie sztucznej poświaty niebieskiej (łuny świetlnej). Przeprowadzono wstępną analizę poziomu zanieczyszczenia świetlnego w formie sztucznej poświaty niebieskiej na tym obszarze, na podstawie zaprezentowanej w 2016 roku modelowej mapy rozkładu natężenia tego czynnika, znanej jako *Atlas Zanieczyszczenia Świetlnego* (Falchi i in. 2016) (ryc. 3).

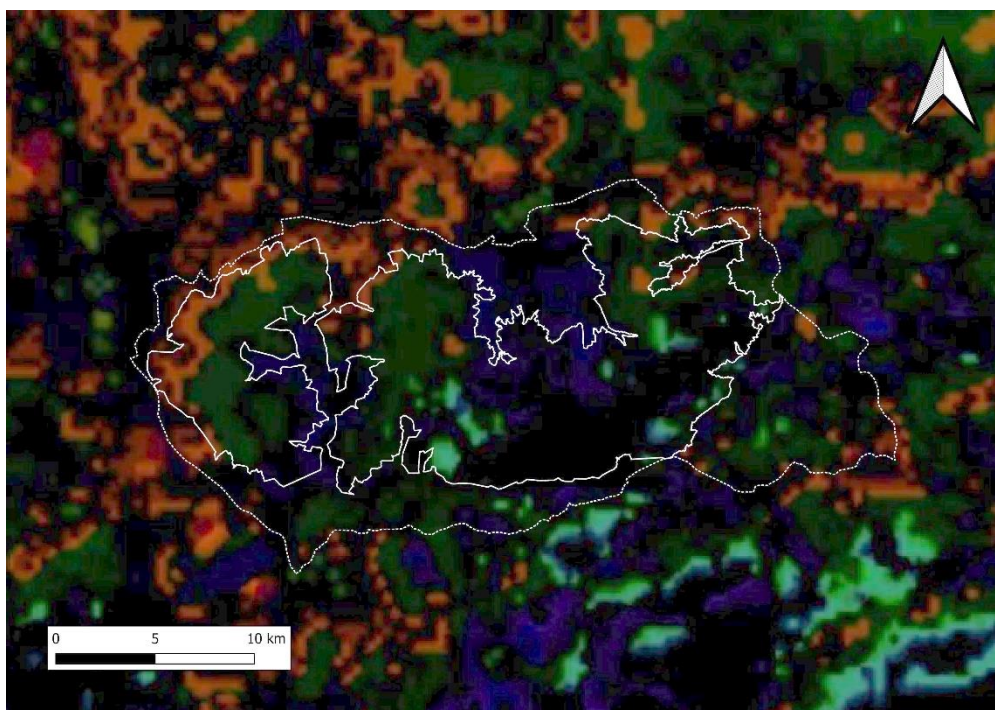


Ryc. 7. Przykładowe zmiany jasności powierzchniowej nocnego nieba ( $S_a$ ) i luminancji ( $L$ ) na stacjach: ABO (pełne koła) i KLD (puste koła), przy braku zachmurzenia (czerwone) oraz przy pełnym zachmurzeniu (niebieskie).

Zaletą opisywanej mapy jest to, że obejmuje obszary w głębi parku, gdzie wykonywanie pomiarów w nocy było z różnych względów niemożliwe. Z analizy tego zasobu wynika, że potencjalnie podatna na wpływ łuny świetlnej jest zachodnia, słaska część parku. Na tym obszarze wyspy świetlne okolicznych miast: Andrychowa, Kęt, Żywca, a zwłaszcza Bielska-Białej wkraczają w obręb otuliny PKBM. W przypadku Bielska-Białej, miejska wyspa świetlna wkracza w głąb samego parku krajobrazowego – przewidywana modelowa wartość  $S_a$  bezchmurnego nieba osiąga tu 20,5 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=0,69$  mcd/m<sup>2</sup>). Zupełnie inna sytuacja panuje we wschodniej, małopolskiej części PKBM, w której średnia wartość  $S_a$  jest równa 21,2 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=0,36$  mcd/m<sup>2</sup>). Oznacza to, że przewidywana luminancja bezchmurnego nieba w części zachodniej PKBM jest prawie dwukrotnie wyższa, niż w części wschodniej. Opierając się na wcześniejszych badaniach (Ścieżor 2018) można ocenić, że w przypadku światła odbitego od chmur przy w pełni zachmurzonym niebie wielkości te przyjąłoby odpowiednio wartości około 19 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=2,7$  mcd/m<sup>2</sup>) i 20 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=1,1$  mcd/m<sup>2</sup>). Niebo o tej jasności powierzchniowej oświetla powierzchnię ziemi z natężeniem znacznie mniejszym niż w przypadku oświetlenia przez księżyc w pełni, przez co nie powinno stanowić zagrożenia ekologicznego.



Źródłami sztucznej poświaty niebieskiej jest przede wszystkim oświetlenie miast (Ścieżor 2021). Porównano satelitarne mapy radiancji obszaru PKBM z lat 2012–2022. Oczywiście, głównym jej źródłem jest Bielsko-Biała, sąsiadująca z zachodnią granicą PKBM. Analiza różnicowa radiancji z lat 2012 i 2022 wykazała, że jedynie w zachodniej części PKBM, sąsiadującej z Bielskiem-Białą nastąpił wzrost jej wartości, co można wiązać z rozbudową wschodnich osiedli mieszkaniowych miasta (ryc. 8). Na pozostałym obszarze nie nastąpił widoczny wzrost radiancji, a w niektórych punktach (np. okolice szczytu Łysina, na północ od Gilowic) widoczne jest jej zmniejszenie. W obrębie otuliny PKBM wyraźniejszy wzrost radiancji daje się zauważyć na południe od Kęt, co również można związać z rozbudową osiedli mieszkaniowych tego miasta. Można jednak uogólnić, że poziom radiancji, a więc również zanieczyszczenia świetlnego w formie sztucznej łuny niebieskiej, pozostaje stały.



Ryc. 8. Radiancja różnicowa w latach 2012 i 2022 na obszarze PKBM (biała linia ciągła) i jego otuliny (biała linia punktowana). Kolor pomarańczowy oznacza znaczące zwiększenie radiancji, zielony – nieznaczny wzrost, niebieski – zmniejszenie.

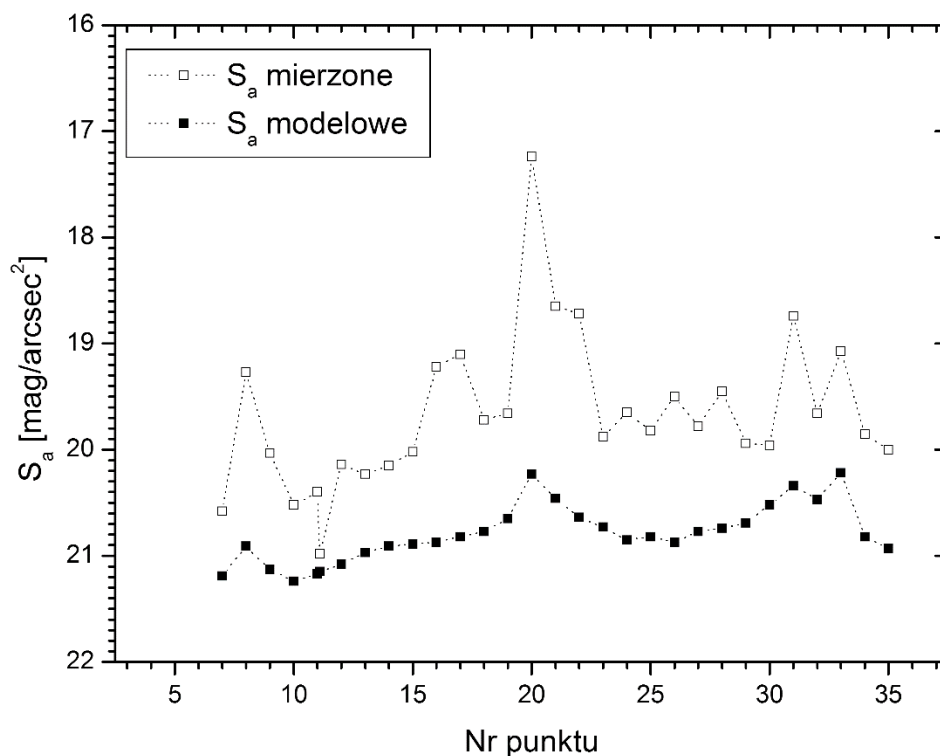
Porównano wartości  $S_a$  otrzymane w czasie pomiarów wykonanych przy bezchmurnym niebie z wartościami, przewidywanymi przez model (Falchi i in. 2016) (Tab. 1).

Tabela 1. Porównanie zmierzonych wartości  $S_a$  dla bezchmurnego nieba (czerwone symbole na ryc. 2) z wartościami przewidzianymi przez model. Jasno szarym tłem zaznaczono punkty leżące wewnątrz otuliny PKBM, ciemno szarym – wewnątrz PKBM.

Punkt pomiarowy	$S_a$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		Różnica
	zmierzone	modelowe	
7	20,58	21,19	-0,61
8	19,27	20,91	-1,64
9	20,03	21,13	-1,10
10	20,52	21,24	-0,72
11	20,40	21,17	-0,77
11.1	20,98	21,15	-0,17
12	20,14	21,08	-0,94
13	20,23	20,97	-0,74
14	20,15	20,91	-0,76
15	20,02	20,89	-0,87
16	19,22	20,87	-1,65
17	19,10	20,82	-1,72
18	19,72	20,77	-1,05
19	19,66	20,65	-0,99
20	17,24	20,23	-2,99
21	18,65	20,46	-1,81
22	18,72	20,64	-1,92
23	19,88	20,73	-0,85
24	19,65	20,85	-1,20
25	19,82	20,82	-1,00
26	19,50	20,87	-1,37
27	19,78	20,77	-0,99
28	19,45	20,74	-1,29
29	19,94	20,69	-0,75
30	19,96	20,52	-0,56
31	18,74	20,34	-1,60
32	19,66	20,47	-0,81
33	19,07	20,22	-1,15
34	19,85	20,82	-0,97
35	20,00	20,93	-0,93
ABO	20,83	20,85	-0,02
KLD	20,45	20,64	-0,19

Stwierdzono, że w każdym punkcie pomiarowym modelowa wartość  $S_a$  jest wyższa o około 1 mag/arcsec<sup>2</sup> od zmierzonej, co oznacza, że bezchmurne nocne niebo jest jaśniejsze od przewidywań modelu (ryc. 9). Różnica ta jest zapewne związana ze wzrostem jasności nocnego nieba między rokiem opublikowania modelu (2016) a wykonywanymi obecnie pomiarami. Możliwe też, że za efekt ten odpowiedzialne jest rozproszenie światła na cząstkach pyłu zawieszonego, pochodzącego ze źródeł niskiej emisji w porze zimowo-wiosennej, gdy

wykonywane były pomiary. Tego efektu model nie uwzględnił, a wielkość różnicy jest zgodna z wcześniej wykonywanymi badaniami wpływu zapylenia atmosfery na jasność nocnego, bezchmurnego nieba (Ścieżor i Kubala 2015).



Ryc. 9. Porównanie mierzonych (białe kwadraty) i modelowych (czarne kwadraty) wartości  $S_a$  w kolejnych punktach pomiarowych, w przypadku bezchmurnego nieba.

Najmniejszą różnicę między modelową i zmierzoną wartością  $S_a$  stwierdzono w pojedynczym punkcie pomiarowym znajdującym się w głębi parku krajobrazowego (11.1). W pozostałych punktach, w obrębie otuliny PKBM, wyraźnie widoczny jest wpływ sąsiednich miejscowości na jasność bezchmurnego nieba, w samym Parku Krajobrazowym efekt ten jest jednak minimalny. Pomijając obszary PKBM bezpośrednio sąsiadujące z okolicznymi miastami można stwierdzić, że średnia wartość  $S_a$  we wschodniej, małopolskiej części jego otuliny wynosi około 20,4 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=0,8$  mcd/m<sup>2</sup>), podczas gdy w zachodniej, śląskiej części jest to 19,9 mag/arcsec<sup>2</sup> ( $L=1,2$  mcd/m<sup>2</sup>).

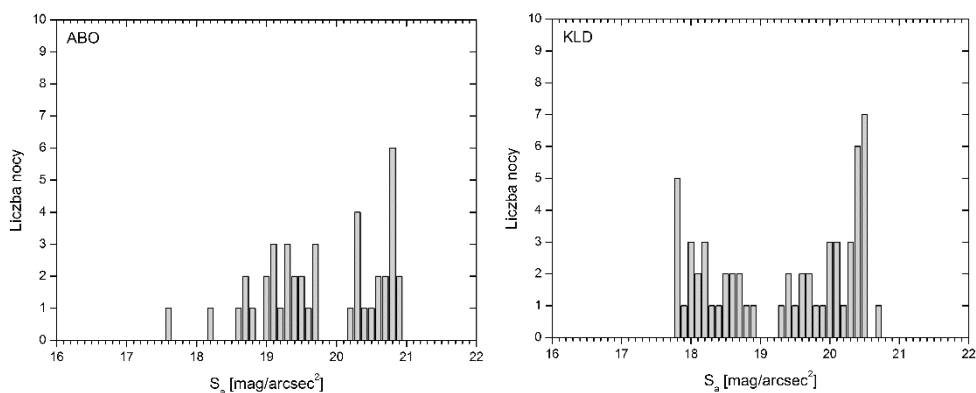
Jak już wykazano wcześniej (Ścieżor 2018), za jasność nieba bezchmurnego odpowiada rozproszone w wyższych warstwach atmosfery światło nawet odległych miast, do odległości około 20 km. W przypadku nieba zachmurzonego za jasność tę odpowiada wyłącznie lokalne oświetlenie naziemne. W badanych



przypadku wyróżnia się grupa punktów 9–12 oraz 18, w których zmierzono  $S_a=17,5 \text{ mag/arcsec}^2$  ( $L=10,89 \text{ mcd/m}^2$ ). Niebo o takiej jasności powierzchniowej oświetla powierzchnię ziemi światłem o natężeniu znacznie mniejszym od około  $0,1 \text{ lx}$ , odpowiadającemu oświetleniu przez księżyc w pełni. Oznacza to, że nawet w pobliżu Żywca i Bielska-Białej odbite od chmur światło nie powinno mieć wpływu na lokalne ekosystemy nocne (Ścieżor 2018). W głębi otuliny, na granicy PKBM,  $S_a$  jest równe około  $19 \text{ mag/arcsec}^2$  ( $L=2,7 \text{ mcd/m}^2$ ), co tym bardziej nie ma wpływu na ekosystemy nocne w obrębie parku.

W przypadku badań prowadzonych na stacjach stacjonarnych stwierdzono, że maksymalna wartość  $S_a$  zmierzona w pierwszej połowie 2023 r. na stacji ABO, położonej w głębi otuliny PKBM, jest praktycznie zgodna z przewidywaniami modelu i wynosi  $20,8 \text{ mag/arcsec}^2$  ( $L=0,5 \text{ mcd/m}^2$ ). W przypadku stacji KLD, położonej już poza otuliną PKBM widoczna jest różnica między wartością przewidzianą modelem ( $20,45 \text{ mag/arcsec}^2$ ), a wartością mierzoną ( $20,64 \text{ mag/arcsec}^2$ ). Można podejrzewać, że wynika ona z rozbudowy sąsiednich Wadowic między datą stworzenia modelu (2016), a terminem wykonania pomiarów.

W celu określenia charakteru zanieczyszczenia świetlnego w formie sztucznej łuny świetlnej dla obu stacji, można wykreślić rozkłady liczebności nocy o określonej wartości  $S_a$ , w okresie od lutego do czerwca 2023 (ryc. 10).



Ryc. 10. Rozkład nocy o określonej jasności powierzchniowej nieba od lutego do czerwca 2023 na stanowiskach stacjonarnych: ABO (po lewej) i KLD (po prawej).

Na obu histogramach widoczne są dwa skupienia nocy: o niższych wartościach  $S_a$  ( $20,2\text{--}20,9 \text{ mag/arcsec}^2$  dla ABO;  $19,3\text{--}20,7 \text{ mag/arcsec}^2$  dla KLD) oraz o wyższych wartościach  $S_a$  ( $18,6\text{--}19,7 \text{ mag/arcsec}^2$  dla ABO;  $17,8\text{--}18,9 \text{ mag/arcsec}^2$  dla KLD). Pierwsze z tych skupień odpowiada nocom bezchmurnym bądź o małym zachmurzeniu, drugie nocom o dużym zachmurzeniu nieba. Wyraźnie widoczna

jest porównywalna liczba tych dwóch kategorii nocy dla obu stacji, jednak istotne jest przesunięcie histogramu w kierunku niższych wartości  $S_a$  dla stacji KLD w stosunku do stacji ABO, co oznacza, że niebo w tym pierwszym przypadku jest zawsze jaśniejsze, niż w drugim. Dominanta dla niskich wartości  $S_a$  w przypadku stacji KLD świadczy o obecności lokalnych silnych źródeł światła rozjaśniających chmury. Źródeł tych jest znacznie mniej w przypadku stacji ABO, niż w przypadku stacji KLD.

## Wnioski

Stwierdzono, że praktycznie na całym obszarze Parku Krajobrazowego Beskidu Małego jasność powierzchniowa łuny świetlnej bezchmurnego nocnego nieba ( $S_a$ ) mieści się w granicach  $20,0 \div 21,0$  mag/arcsec<sup>2</sup>. W skali Berry'ego (1976), określającej poziom zanieczyszczenia świetlnego, oznacza to poziom czwarty<sup>1</sup>. W skali, zaproponowanej niegdyś przez autora niniejszego opracowania, jest to wartość typowa dla klasy C obszarów zanieczyszczonych świetlnie, obejmującej średnie i małe miasta położone w obszarach średnio uprzemysłowionych oraz dalekie przedmieścia dużych miast w obszarach silnie uprzemysłowionych (Ścieżor i in. 2010). Jedynie w częściach otuliny PKBM położonych w pobliżu miast,  $S_a$  mieści się w granicach  $17,0 \div 19,0$  mag/arcsec<sup>2</sup>, klasyfikując je w kategorii A (duże, uprzemysłowione miasta), przy szóstym poziomie w klasyfikacji Berry'ego<sup>2</sup>. Potwierdzono również, zgodne z modelem (Falchi i in.), znacznie mniejsze zanieczyszczenie światłem wschodniej, małopolskiej części PKBM, co związane jest z brakiem dużych miejscowości w pobliżu. Należy jednak podkreślić, że nawet w zachodniej części PKBM rozjaśnienie nocnego, bezchmurnego nieba jest zbyt niskie, aby mieć znaczący wpływ ekologiczny.

Jak już wcześniej stwierdzono (Ścieżor 2020), znacznie istotniejsze dla ekosystemów nocnych jest światło odbite od podstawy chmur przy całkowicie zachmurzonym niebie. O ile jednak w przypadku bezchmurnego nieba głównymi źródłami sztucznej poświaty niebieskiej są dalekie, silnie rozjaśniające niebo ośrodki miejskie, o tyle w przypadku nieba zachmurzonego dominuje wpływ lokalnych źródeł światła. W przypadku PKBM są to w większości niewielkie miejscowości, rozmieszczone w obrębie jego otuliny, lub nawet w samym parku. W obrębie otuliny widoczny jest silny wpływ sąsiadujących osiedli miejskich, jednak w PKBM wartość  $S_a$  mieści się w granicach  $19,0 \div 19,5$  mag/arcsec<sup>2</sup>. Niebo

---

<sup>1</sup> „Obraz Drogi Mlecznej w zenicie jest mało kontrastowy, a drobne szczegóły niewidoczne, zasięg widoczności gwiazd jest znacznie ograniczony i nie sprawiają już wrażenia wielkich i bliskich, chmury są jasne nawet w zenicie” (Berry 1976).

<sup>2</sup> „Gwiazdy są słabe i wyblakłe, zredukowane do liczby kilkuset, niebo jest jasne i wyblakłe na całej powierzchni” (Berry 1976).

o tej jasności oświetla powierzchnię ziemi światłem o zbyt niskim natężeniu, aby mogło mieć ono wpływ na lokalne ekosystemy nocne (Ścieżor i Czaplicka 2020). Jedyne zagrożenie dla ptaków migrujących nocą mogą stanowić widoczne nad horyzontem łuny świetlne Bielska-Białej i całej aglomeracji śląskiej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że pasmo Beskidu Małego, obejmujące park krajobrazowy tego pasma, a w szczególności chroniące biosferę obszary Natura 2000, nie są obecnie narażone na niekorzystne oddziaływanie zanieczyszczenia świetlnego. Oczywiście, w związku z rozwojem cywilizacyjnym regionu sytuacja ta może ulec zmianie. Prowadzony obecnie stały monitoring w stacjach pomiarowych ABO i KLD, jak też planowane pomiary objazdowe, pozwolą na określenie panujących w tym obszarze trendów.

## Literatura

- Berry R.L., 1976. Light Pollution in Southern Ontario, *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 70(3): 97–115.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 2: e1600377. DOI:10.1126/sciadv.1600377.
- Gaston K.J., Davies T.W., Bennie J., Hopkins J., 2012. Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of Applied Ecology* 49(6): 1256–1266. DOI:10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x.
- Lacoeuilhe A., Machon N., Julien J.-F., Le Bocq A., Kerbiriou C., 2014. The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context. *PLOS ONE* 9(10): e103042. DOI:10.1371/journal.pone.0103042.
- Mapa, 2006 [on-line] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Beskid\\_Ma%C5%82y#/media/Plik:Beskid\\_Ma%C5%82y\\_bez\\_podk%C5%82adu\\_Wiki\\_2006.png](https://pl.wikipedia.org/wiki/Beskid_Ma%C5%82y#/media/Plik:Beskid_Ma%C5%82y_bez_podk%C5%82adu_Wiki_2006.png) (dostęp: 26.06.2023).
- Marcinkowska S., Tęgowska E., 2015. Oddziaływanie światła o różnym spektrum na bezkręgowce zmierzchu i pełnego dnia. *KOSMOS* 64(4): 589–597.
- Rich C., Longcore T. (ed.), 2006. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press.
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 25 marca 2022 r. w sprawie specjalnego obszaru ochrony siedlisk Beskid Mały (PLH 240023)*. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Dz.U. 2022 poz. 1016, 13.05.2022.
- Stare J., 2023. *VIIRS Maps*. Earth Observation Group, NOAA National Geophysical Data Center [on-line] <https://www.lightpollutionmap.info> (dostęp: 26.06.2023).
- Stone E.L., Jones G., Harris S., 2015. Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mammalian Biology* 80: 213–219. DOI:10.1016/j.mambio.2015.02.004.
- Stone E.L., Jones G., Harris S., 2009. Street Lighting Disturbs Commuting Bats. *Current Biology* 19: 1123–1127. DOI:10.1016/j.cub.2009.05.058.

- Ścieżor T., 2018. Naturalne i antropogeniczne czynniki łuny świetlnej nocnego nieba. *Monografie Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Ścieżor T., 2020. The impact of clouds on the brightness of the night sky. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 247: 106962. DOI:10.1016/j.jqsrt.2020.106962.
- Ścieżor T., 2021. Effect of street lighting on the urban and rural night-time radiance and the brightness of the night sky. *Remote Sensing* 13(9): 1–41. DOI:10.3390/rs13091654.
- Ścieżor T., Czaplicka A., 2020. The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 254: 107168. DOI:10.1016/j.jqsrt.2020.107168.
- Ścieżor T., Kaszowski W., Kubala M., Dworak T.Z., 2010. Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej. *Inżyniera Środowiska* 388, Politechnika Krakowska, Kraków.
- Ścieżor T., Kubala M., 2015. Wpływ zapylenia atmosfery na jasność nocnego nieba. *KOSMOS – problemy nauk biologicznych* 64(4): 579–587.
- Tałańda J., 2015. Ekologiczne zanieczyszczenie światłem, czyli kiedy sztuczne światło w nocy zaburza naturalny cykl światła i ciemności w ekosystemie. *KOSMOS* 64(4): 611–616.
- Uchwała nr XVII/229/20 Sejmiku Województwa Małopolskiego z dnia 27 stycznia 2020 roku w sprawie ustanowienia planu ochrony dla Parku Krajobrazowego Beskidu Małego – część położona w województwie małopolskim uwzględniającego zakres planu dla obszaru Natura 2000 Beskid Mały PLH 240023. *Dziennik Urzędowy Województwa Małopolskiego*, Kraków [on-line] [http://edziennik.malopolska.uw.gov.pl/WDU\\_K/2020/1104/akt.pdf](http://edziennik.malopolska.uw.gov.pl/WDU_K/2020/1104/akt.pdf) (dostęp: 26.06.2023).
- Walker M.F., 1977. The Effects of Urban Lighting on the Brightness of the Night Sky. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 89: 405–409.
- Wojciechowska R., 2019. Czy oświetlenie nocne może zaburzać funkcjonowanie roślin? [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. CBK PAN, Warszawa: 39–54.
- Zych M., Ryniewicz J., 2019. Nocna zmiana: w jaki sposób zanieczyszczenie światłem wpływa na mutualistyczne relacje roślin i ich zapylaczy? [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. CBK PAN, Warszawa: 55–68.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań poziomu zanieczyszczenia świetlnego w formie sztucznej poświaty niebieskiej na obszarze Beskidu Małego w Karpatach Zachodnich. Obszar ten, jak dotąd nie objęty tego typu analizą, jest interesujący dla badanego zagadnienia, gdyż znajduje się pomiędzy tak silnymi centrami zanieczyszczenia światłem, jakimi są Aglomeracja Krakowska i Aglomeracja Śląska z jednej strony, a częściowo chronionym świetlnie obszarem Beskidu Żywieckiego. Niezależnie od pomiarów mobilnych, ustawiono stacjonarne stacje pomiarowe na północnych stokach wymienionego pasma, opodal głównych ośrodków miejskich w tym rejonie: Wadowic i Andrychowa. W celu oceny poziomu zanieczyszczenia świetlnego wykorzystano zarówno dane satelitarne z ostatnich dziesięciu lat, jak też dane pomiarowe jasności łuny świetlnej nocnego nieba otrzymane przy pomocy mierników SQM, w różnych warunkach atmosferycznych. Stwierdzono, że sztuczne światło emitowane z obszarów wymienionych miast, jak również ich satelitarnych miejscowości, wkracza głęboko w obszary górskie Beskidu Małego, jednak w mniejszym stopniu, niż sugerowałyby to wartości modelowe. Ponadto stwierdzono, że stopień penetracji światła w tego rodzaju obszary silnie zależy od warunków atmosferycznych. W warunkach bezchmurnego nieba zasięg ten jest bardzo duży, jednak jasność łuny świetlnej jest wtedy niewielka. Przy pełnym zachmurzeniu jasność łuny świetlnej jest wysoka, mogąc wpływać na lokalne ekosystemy, jednak penetracja światła ogranicza się wtedy do bezpośredniego sąsiedztwa miejscowości. Planowane jest ustanowienie stacji pomiarowych na badanym terenie, co powinno pomóc rozwiązać problem wpływu ukształtowania terenu na modelowe przewidywania jasności łuny świetlnej.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie świetlne, łuna świetlna, park krajobrazowy, obszary Natura 2000, ochrona przyrody.

## Light pollution in the area of the Beskid Mały Landscape Park

### Summary

The paper presents the preliminary results of research on the level of light pollution in the form of artificial sky glow in the area of Beskid Mały in the Western Carpathians. This area, so far not covered by this type of analysis, is interesting for the researched issue, because it is located between such strong centres of light pollution as the Krakow Agglomeration and the Silesian Agglomeration on the one hand, and the partially light-protected area of the Żywiec Beskids. Regardless of the mobile measurements, stationary measurement stations were set up on the northern slopes of the mentioned range, near the main urban centres in this area: Wadowice and Andrychów. In order to assess the level of light pollution, both satellite data from the last ten years were used, as well as measurement data of the brightness of the night sky glow obtained using SQM meters in various atmospheric conditions. It was found that artificial light emitted from the areas of the mentioned cities, as well as their satellite towns, penetrates deep into the mountain areas of the Beskid Mały, but to a lesser extent than the model values would suggest. In addition, it was found that the degree of light penetration into such areas strongly depends on atmospheric conditions. In conditions of a clear sky this range is very large, but the brightness of the sky glow is then low. With the full cloud cover, the brightness of the sky glow is high, affecting local ecosystems, but the penetration of light is then limited to the immediate vicinity of the town. It is planned to establish further measurement stations in the study area, which should help solve the problem of the impact of the terrain on model predictions of the brightness of the light glow.

**Key words:** light pollution, sky glow, landscape park, Natura 2000 areas, nature protection.

### Dane kontaktowe autora:

**Tomasz Ścieżor**  
Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
e-mail: tsciezor@pk.edu.pl

Nocna panorama Torunia wykonana z terenu kampusu Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w stronę południową (fot. Mieczysław Kunz)



**Dominika Karpińska, Mieczysław Kunz**

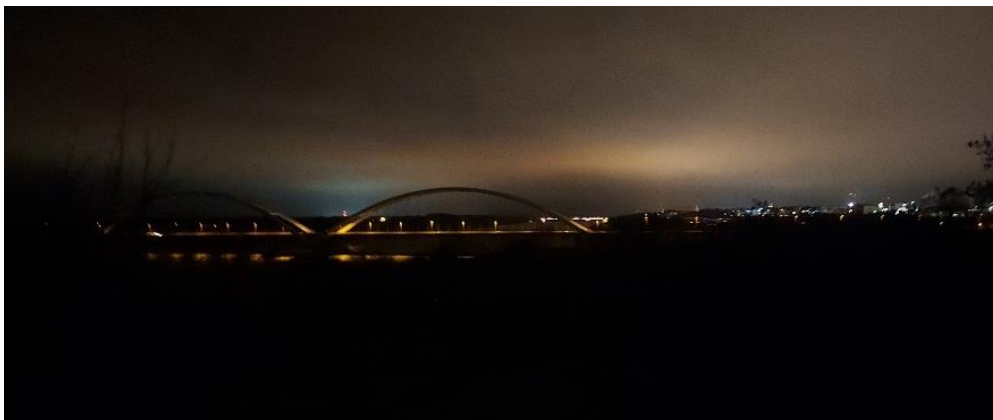
## **Pomiar zanieczyszczenia światłem nocnego nieba – od demonstratora technologii do systemu monitoringu**

### **Wprowadzenie**

Zanieczyszczenie światłem to postępująca degradacja otaczającego środowiska naturalnego, która definiowana jest jako nadmierna emisja sztucznego światła w dolną część atmosfery oddziałująca w dłuższym okresie czasu. Łuna świetlna rozciągająca się nad miastem (ryc. 1) widoczna jest już z odległości nawet kilkudziesięciu kilometrów (Falchi i in. 2016; Jechow i in. 2017; Linares i in. 2020). Statystycznie ponad 99% mieszkańców Europy oraz 80% mieszkańców świata zamieszkuje tereny zanieczyszczone sztucznym światłem (Falchi i in. 2016). Zjawisko to ma więc charakter globalny i rozlewa się przestrzennie z upływem czasu, wraz z postępującym rozwojem cywilizacji i powstawaniem kolejnych osiedli mieszkaniowych oraz nieprzemyślaną rozbudową świetlnej infrastruktury drogowej, użytkowej i reklamowej.

Zanieczyszczenie światłem wywołane jest nadmierną punktową i powierzchniową emisją niepoprawnie zaprojektowanego lub zamontowanego oświetlenia, które zostało nieodpowiednio ukierunkowane. Zjawisko wzmacnia obecność rozświetlonych neonów reklamowych oraz nadmiernych podświetleń elementów architektonicznych i iluminacji miejskich. Dodatkowo przeprowadzone badania udowadniają, iż zanieczyszczenie światłem potęgowane jest przez rozpraszanie sztucznego światła w atmosferze przez obecne w jej składzie pyły pochodzenia antropogenicznego a także wzmacnia je odbicie światła od występujących chmur, zwłaszcza piętrowego i średniego (Ścieżor i in. 2010; Pun i in. 2013; Ribas i in. 2016; Hänel i in. 2017; Karpińska i Kunz 2019; Kocifaj i Bará 2020; Ścieżor 2020).





Ryc. 1. Panorama Torunia, dokumentująca zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba (fot: Dominika Karpińska).

Zjawisko będące przedmiotem zainteresowania, jak każdy element pogarszający stan środowiska naturalnego, ma swoje negatywne konsekwencje dla otoczenia. Nadmierna emisja światła w nocy prowadzi do zaburzeń rozwoju roślin i zwierząt, a także istotnie wpływa na pogorszenie się zdrowia człowieka, jakości jego życia oraz codziennego funkcjonowania (Longcore i in. 2017; Garcia-Saenz i in. 2018). Negatywnym skutkiem tego zjawiska jest także oświetlenie obszarów, które nie powinny być na to narażone oraz olśniewanie przypadkowych osób, zarówno pieszych, jak i kierowców, co może prowadzić do niebezpiecznych sytuacji, zdarzeń i zachowań (Kołomański 2015). W postępującym od początku 2022 roku kryzysie energetycznym nieprzemysłane, niewłaściwie zaprojektowane oświetlenie zewnętrzne powoduje nadmierne zużycie energii elektrycznej, co dla samorządów wszystkich szczebli oraz osób prywatnych oznacza poniesienie dodatkowych kosztów.

Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba można mierzyć na kilka sposobów. Zostały one opracowane celem wykorzystania zarówno przez amatorów, jak i specjalistów (Kolláth 2010; Pun i in. 2013; Falchi i in. 2016; Ribas i in. 2016; Hänel i in. 2017; Karpińska i Kunz 2019). Pod względem zaawansowania można je podzielić na metody obserwacyjne i instrumentalne. Wśród nich wyróżnia się m.in. pomiary nieuzbrojonym okiem, pomiary fotometrem, wykonywanie zdjęć nocnych czy analiza zobrażeń satelitarnych i coraz powszechniej, nocnych zdjęć lotniczych.

W badaniach typowo ilościowych tego zjawiska najczęściej wykorzystywaną i najbardziej rozpowszechnioną metodą jest pomiar fotometryczny z wykorzystaniem manualnych lub bardziej zaawansowanych fotometrów oraz analiza zdjęć nocnego nieba wykonywanych aparatami z obiektywami

sferycznymi (ang. *all-sky*). Takie metody stosowane są przez naukowców z całego świata, łącznie z niektórymi grupami badaczy krajowych (Kolláth 2010; Pun i in. 2013; Ribas i in. 2016; Hänel i in. 2017; Karpińska i Kunz 2019, 2020).

W celach skutecznej ochrony środowiska przed tym kolejnym rodzajem zanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego, w niektórych krajach Europy rozpoczęto wprowadzanie regulacji dotyczących zewnętrznej emisji sztucznego światła (*Light pollution reduction measures in Europe 2022*). Prawo człowieka do korzystania z ciemnego nieba oraz ochrona środowiska przed skutkami jego świetlnego zanieczyszczenia zostało już wprowadzone w kilku krajach świata, w tym m.in. w Chorwacji, Niemczech czy Francji oraz ostatnio w Czechach. Jednak zdecydowana większość krajów Europy, w tym także Polska, nie posiada jeszcze takich zapisów prawnych czy ustanowionych norm, a wręcz nawet nie rozpoczęła dyskursu publicznego na ten temat. W Polsce w ostatnim roku grupa ekspertów z kilku polskich jednostek naukowych opracowała istotny dokument – *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego* (Szlachetko 2022), które zgodnie z założeniami ma być początkiem prac nad przygotowaniem krajowych regulacji prawnych w tym zakresie, a także słyszalnym głosem specjalistów różnych profesji zwracających uwagę na opisane zagadnienie.

### **Interdyscyplinarny zespół badawczy i współpraca instytucjonalna**

Pomiar, analiza oraz interpretacja zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba jest bardzo złożonym zagadnieniem, który wymaga wielowątkowych badań i prac przyczynkowych, realizowanych przy współpracy osób reprezentujących różne dyscypliny naukowe.

Opisywany projekt związany z tematyką wykorzystania nowoczesnych technologii akwizycji i transmisji danych pomiarowych w środowisku miejskim od samego początku ukierunkowany był na współpracę interdyscyplinarną i w miarę jego postępującej realizacji i diagnozowanych potrzeb do zespołu zapraszani byli kolejni specjaliści. Początkowo (2019) pomysł wykonania tego zadania zaproponowany został jako typowy projekt doktorski o charakterze aplikacyjnym, ale wraz z jego intensywną realizacją został poszerzony o drugą ścieżkę – innowacyjno-rozwojową, która niejako wymusiła rozbudowę zespołu. Obecnie (2023) w jego skład wchodzi 5 specjalistów z zakresu monitoringu środowiska, geoinformacji i geoinformatyki, automatyki oraz systemów pomiarowych. Osoby te reprezentują Katedrę Geomatyki i Kartografii Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej oraz Katedrę Automatyki i Systemów Pomiarowych Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Dzięki takiemu podejściu udało się

wpracować koncepcję rozwiązania, opracować prototyp i skutecznie go przetestować, zbudować docelowe urządzenie pomiarowe i zająć się optymalizacją użytkowo-funkcjonalną, a także wdrożyć do działania system monitoringu. Dodatkowo, w pracach nad rozwojem i komercjalizacją rozwiązania od ponad roku uczestniczy Broker Innowacji z Centrum Przedsiębiorczości Akademickiej i Transferu Technologii UMK oraz konsultant z Toruńskiej Agencji Rozwoju Regionalnego S.A. w Toruniu.

Aby skutecznie realizować zaplanowane etapy prac, a także z powodzeniem i na bieżąco rozwiązywać napotymane ograniczenia techniczne i problemy technologiczne, niezbędne było wykorzystanie istniejącego już doświadczenia branżowych firm komercyjnych oraz tworzonych baz wiedzy. W tym celu systematycznie zapraszane były do współdziałania w charakterze doradców w poszczególnych wysoko specjalistycznych etapach działań wybrane firmy, a współpraca ta zawsze miała wymiar formalny i zadaniowy. W okresie od 2019 roku dla sprawnej realizacji tego projektu podpisano listy intencyjne z TARR S.A. IoT North Poland Hub, EXEA Sp. z o.o. Centrum Przetwarzania Danych z Torunia oraz z ACTE Sp. z o.o z Warszawy. Dzięki temu dużo skuteczniej można było poruszać się w tej skomplikowanej materii na styku kilku dziedzin i ograniczać napotymane bariery techniczne, logistyczne i organizacyjne.

W lipcu 2022 roku zawiązany został pierwszy w Polsce Light Pollution Think Tank – LPTT. Jego powstanie możliwe było dzięki dotacji Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego uzyskanej przez Stowarzyszenie POLARIS-OPP, a całe przedsięwzięcie było odpowiedzią na rosnące w naszym kraju zjawisko zanieczyszczenia sztucznym światłem oraz brak obowiązujących przepisów prawnych w zakresie polityki oświetlenia zewnętrznego. Autorzy niniejszego rozdziału weszli w skład tego think tanku, a wyniki pomiarów uzyskiwane z wdrażanego w Toruniu systemu monitoringu nocnego nieba będą jednym z elementów przygotowywanego na koniec 2023 roku raportu – audytu nt. stanu zanieczyszczenia sztucznym światłem w Polsce.

### **Etapy realizacji projektu**

Pierwsze badania nad pomiarem zanieczyszczenia światłem na terenie Torunia rozpoczęły się w połowie 2017 roku. Pomiar wykonywany był wówczas ręcznym fotometrem SQM (zobacz rycina 5a) na wytypowanych 24 stanowiskach obserwacyjnych rozmieszczonych na terenie całego miasta (Karpińska i Kunz 2019, 2020). Ponadroczny, systematycznie prowadzony monitoring, pozwolił na analizy oraz opracowanie pierwszych map rozkładu przestrzennego zjawiska w Toruniu, zarówno w ujęciu sezonowym jak i rocznym. Pozyskane doświadczenie terenowe oraz zdobyta wiedza w zakresie zmienności

przestrzennej i wpływie wybranych elementów na mierzone wartości umożliwiła zaplanowanie kolejnego projektu, którego jednym z celów była optymalizacja powtarzalnego procesu pomiarowego i akwizycji danych. Najważniejszą zmianą było wykorzystanie w procesie pomiarowym zdalnego transferu danych, co zredukowało dla tak dużego obszaru ograniczenia czasowe, organizacyjne i logistyczne dominujące przy stosowaniu metody ręcznej, a także wpłynęło na powtarzalność dzienną i porównywalność realizowanych pomiarów. Zjawisko zanieczyszczenia światłem charakteryzuje się bowiem zmiennością w zależności nie tylko od fazy księżyca, ale przede wszystkim od występujących warunków atmosferycznych i jakości powietrza (Ścieżor i in. 2010; Ribas i in. 2016). W bezchmurne noce oraz w noce całkowicie zachmurzone otrzymane pomiary są do siebie zbliżone, natomiast w czasie nocy o zmiennym zachmurzeniu wyniki mogą przyjmować wartości znacznie różniące się od siebie. Jest to spowodowane istotnym wpływem zachmurzenia na pomiary jasności nocnego nieba. Dlatego na analizowanym obszarze badania powinny być wykonywane w podobnym czasie, aby wykluczyć ewentualny wpływ zmian pogodowych. Realizacja projektu składała się z kilku wyraźnie wyróżnionych poniżej podetapów oraz działań testowych i walidacyjnych.

### **Budowa automatycznej sieci pomiarowej**

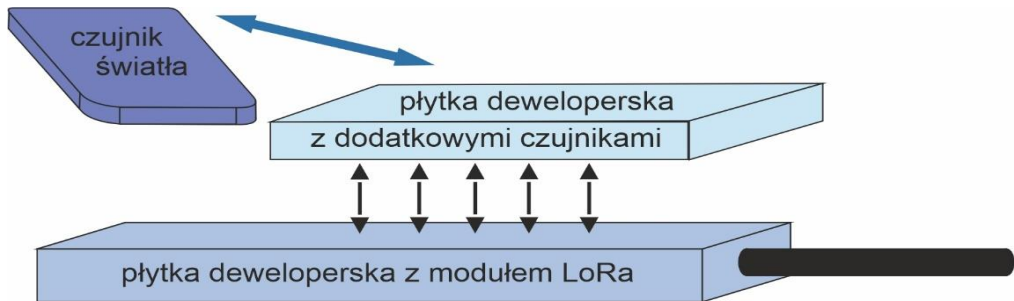
Analizując zdiagnozowane czynniki mogące wpłynąć na pomiar opisywanego zjawiska ustalono, iż pomiary będą wykonywane zdalnie za pośrednictwem technologii LoRaWAN (Semtech Corporation 2015; Mikhaylov i in. 2018). Wyniki skierowanej w nadir rejestracji będą zbierane w interwale 15-minutowym, począwszy od godziny 21:00 aż do godziny 06:00 następnego dnia z jednoczesnym przesyłem wartości do serwera i zapisaniu ich w zdefiniowanej chmurze dyskowej. Po wypracowaniu koncepcji rozpoczęto pracę nad stworzeniem automatycznego urządzenia własnej konstrukcji, łączącego się za pośrednictwem sieci LoRaWAN z bramą komunikacyjną (Karpińska i Kunz 2022). Tabela 1 prezentuje wykaz podstawowych parametrów technicznych zaprojektowanego urządzenia pomiarowego.

Z uwagi na przyjętą mobilność i umiejscowienie stanowisk pomiarowych bez dostępu do elektryczności, konieczne było wybranie takiej technologii, która pozwoliłaby na efektywne wykorzystanie zasilania bateryjnego. W celu oszczędności energetycznej, urządzenie powinno pracować w trybie obniżonego poboru energii oraz wybudzać się tylko na czas trwania założonych nocnych sesji pomiarowych (ryc. 2). Dla zapewnienia dokładnych pomiarów jasności powierzchniowej nocnego nieba, wykorzystano do budowy urządzenia

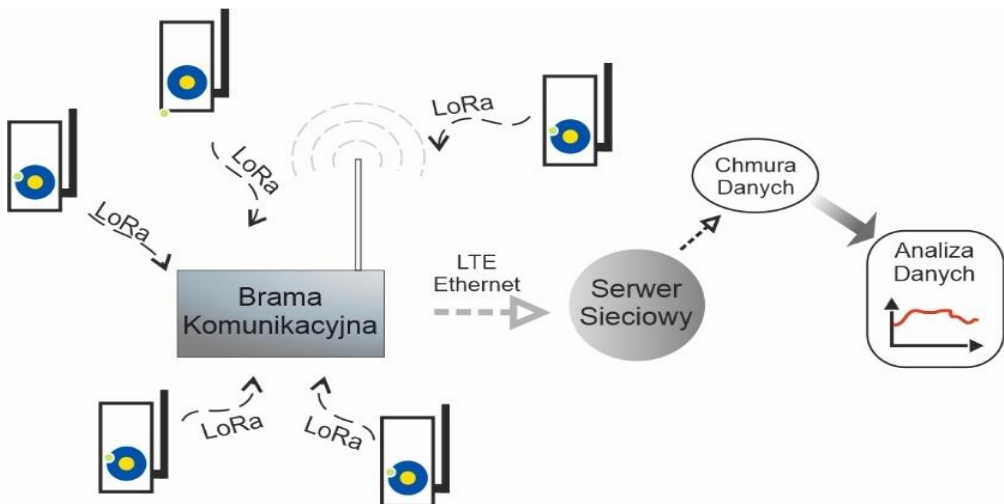
pomiarowego czujnik światła o dużej dokładności, który został już na etapie fabrycznym odpowiednio skalibrowany (Adafruit 2019).

Tabela 1. Wybrane parametry techniczne skonstruowanego urządzenia pomiarowego.

Parametr	Charakterystyka
waga	380 g
wymiary	5,5 x 8,2 x 15,8 cm
standard przesyłania danych	LoRaWAN
pasmo częstotliwości	868 MHz
czas działania [3 000 mAh]	~ 9 miesięcy
zasięg w terenie zabudowanym	3–4 km
częstotliwość pomiarów	15 min
liczba pomiarów w czasie doby	36
czas operacyjny	21:00 – 06:00 CEST
czujniki pomiarowe	natężenie światła, temperatura, wilgotność
kąt zbierania danych	27°
klasa szczelności	IP65



Ryc. 2. Schemat ideowy zaprojektowanego urządzenia pomiarowego własnej konstrukcji.

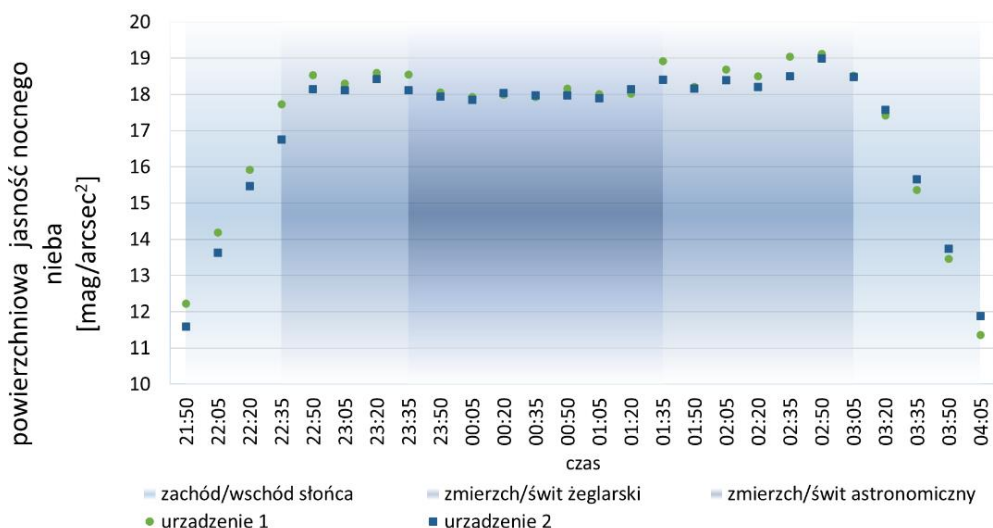


Ryc. 3. Schemat systemu monitoringu zanieczyszczenie nocnego nieba sztucznym światłem.

Po przeprowadzeniu pierwszych testów sprawności i poprawności działania wszystkich elementów systemu, bliźniacze pod względem konstrukcji urządzenia zostały połączone w spójną sieć pomiarową, którą docelowo zaplanowano rozmieścić na terenie Torunia i okolic. Przyjęte założenie zbierania danych pomiarowych wraz z ich dalszym procesem przetwarzania przedstawiono na rycinie 3.

### Demonstrator technologii

Pierwszym etapem sprawdzenia poprawności działania kluczowych urządzeń przyszłej sieci pomiarowej, było przeprowadzenie testów w warunkach operacyjnych na terenie Toruńskiego Parku Technologicznego. Testy te będące tzw. demonstratorem technologii, czyli sprawdzeniem działania prototypu, rozpoczęły się 12 maja 2020 roku i polegały na tym, iż do funkcjonującej dla innych zastosowań bramy komunikacyjnej MultiTech Systems Inc. (USA) podłączono zdalnie dwa urządzenia pomiarowe i umieszczono je na wybranych dachach budynków. Urządzenia nawiązały poprawne i trwałe połączenie z siecią, przesyłały dane w wyznaczonym interwale i zakresie czasowym, po czym przechodziły w tryb uśpienia i następnie wybudzały się zgodnie z przyjętym harmonogramem. Na etapie tym zapis danych na serwerze działał poprawnie, jednak w celu przejrzystości zapisu wszystkich gromadzonych wyników konieczna była zmiana wielkości wysyłanej z urządzeń ramki danych. Jeden z pierwszych uzyskanych wyników pomiarów przedstawia rycina 4. Na wykresie, podobnie jak w przypadku prezentacji wyników z innych rejonów świata, użyta została jednostka wielkości *magnitudo*, która opiera się na odwrotnej skali logarytmicznej.



Ryc. 4. Pierwsze wyniki pomiarów jasności nocnego nieba uzyskane z prototypowych urządzeń w ramach tzw. demonstratora technologii.

Oznacza to, iż podczas interpretacji wyników należy pamiętać, że najciemniejsze niebo będzie miało jasność około  $22 \text{ mag/arcsec}^2$ , natomiast niebo zanieczyszczone światłem charakteryzują wartości znacznie niższe, nawet w zakresie  $14\text{--}16 \text{ mag/arcsec}^2$  (Jechow i in. 2017; Karpinska i Kunz 2020).

Na rycinie tej w celu lepszej prezentacji uzyskanych wyników dodano w tle odcieniami koloru niebieskiego przybliżony czas trwania nocy astronomicznej oraz nocy cywilnej. Dzięki temu od razu widoczna jest zależność wartości jasności nocnego nieba od intensywności promieni słonecznych. Takie zestawienie pozwala ustalić, które dane obrazują niebo zanieczyszczone światłem sztucznym pochodzenia antropogenicznego.

Przeprowadzone testy pokazały jednak niedoskonałość urządzenia, polegającą na bardzo krótkim czasie działania na jednym zestawie zasilającym. Okazało się, że żywotność operacyjna pierwszych dwóch urządzeń wynosiła jedynie 5–7 dni i po tym okresie dla zachowania ciągłości pomiarów musiała nastąpić wymiana pakietów baterii. Ten słaby punkt prototypu i jego ograniczenie użytkowe było przedmiotem pogłębionych analiz zastosowanych komponentów oraz dodatkowej pracy i testów laboratoryjnych. Po ingerencji w układ elektroniczny zastosowanej płytki deweloperskiej, polegającej na celowym odłączeniu niektórych zbędnych funkcji, docelowy czas pracy został zoptymalizowany i obecnie wynosi około 9 miesięcy nieprzerwanego działania.

### **Terenowe pomiary porównawcze z urządzeniami fabrycznymi SQM**

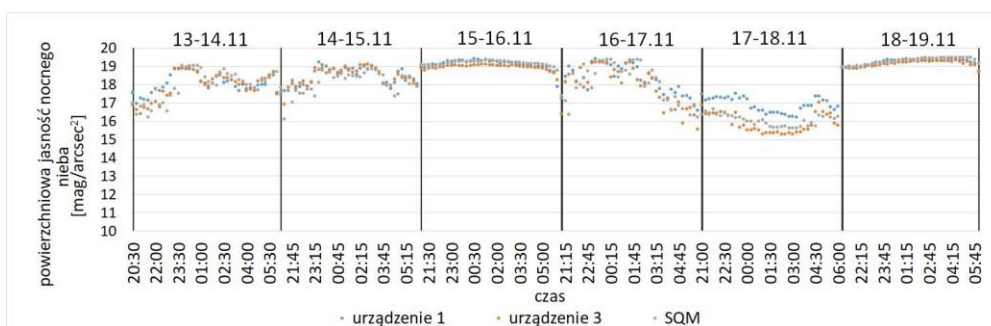
Następnym etapem testowania skonstruowanego urządzenia było jego umieszczenie i jednoczesne wykonywanie powtarzalnych pomiarów w dłuższym okresie czasu w sąsiedztwie fabrycznego fotometru SQM-LU kanadyjskiej firmy Unihedron (ryc. 5).



Ryc. 5. Stosowane urządzenia pomiarowe: ręczny fotometr SQM wykorzystany w pierwszym etapie prac (po lewej), widoczny bez zewnętrznej obudowy fotometr SQM w wersji LU wykorzystywany, jako tło pomiarowe (na środku) oraz autorskiej konstrukcji rejestrator jasności powierzchniowej nieba (po prawej) (fot: Dominika Karpińska).

Wspólną cechą wszystkich powyższych urządzeń był zamontowany czujnik światła o bardzo zbliżonych parametrach technicznych.

Pomiary te przeprowadzone zostały na przełomie listopada i grudnia 2020 roku. Fabryczny fotometr SQM-LU umieszczono w pobliżu działającego już w sieci autorskiego urządzenia, tak aby w momencie pomiaru zostały zachowane identyczne warunki zewnętrzne, zarówno meteorologiczne, jak oświetleniowe. Rycina 6 przedstawia uzyskane na tym etapie wyniki pomiarów jasności nocnego nieba. Wahania w przebiegu wszystkich zarejestrowanych wartości widoczne w kolejnych dniach wynikają ze zmienności warunków atmosferycznych. Niższe wyniki wskazują na rejestrację w okresie większego zachmurzenia, wyższe natomiast w czasie mniejszego lub bezchmurnego nieba.



Ryc. 6. Wyniki porównawcze wartości jasności nocnego nieba wykonane jednocześnie za pomocą urządzeń – autorskiego i fabrycznego (SQM), zamontowanych na tarasie obserwacyjnym WNoZiGP UMK.

Uzyskane na tym etapie wartości pomiarowe dokumentują poprawność działania skonstruowanego własnego urządzenia rejestrującego w odniesieniu do fabrycznego fotometru SQM. Nieznaczne różnice w postaci widocznego na wykresach odchylenia wynikają wyłącznie ze zbliżonej, a nie identycznej czułości widmowej wykorzystanych czujników światła (Adafruit 2019; Karpińska i Kunz 2022).

### **Testowanie powtarzalności rejestracyjnej zestawów pomiarowych tworzących przyszłą miejską „chmurę” obserwacyjną zjawiska**

Celem tego etapu było zbadanie poprawności działania i dokładności pomiarowej wszystkich 40 zbudowanych urządzeń pomiarowych. Aby było to miarodajne i porównywalne to zaplanowane testy zostały zrealizowane w jednym czasie, na jednym stanowisku i w podobnych warunkach zewnętrznych, i dodatkowo w sąsiedztwie fabrycznego rejestratora (ryc. 7).

Przeprowadzony eksperyment wykazał zgodność wyników pomiarów wszystkich zbudowanych urządzeń (Karpińska i Kunz 2022). Uzyskane wyniki



jasności nocnego nieba pokrywały się w sposób znaczący z danymi uzyskanymi z fotometru SQM działającego równolegle. Aby dokładniej statystycznie przeanalizować zebrane dane wyliczona została średnia ze wszystkich pomiarów w każdym punkcie interwałów czasowych oraz odchylenie standardowe uzyskanych wyników.



Ryc. 7. Testowanie „chmury” powtarzalnych, autorskich urządzeń pomiarowych (lewo) na tarasie obserwacyjnym WNoZiGP UMK w bliskim sąsiedztwie działającego już w sieci monitoringu urządzenia oraz dodatkowo zamontowanego obok fabrycznego fotometru SQM (prawo) (fot: Mieczysław Kunz).

Podczas stałych warunków pogodowych wyniki te były zgodne a odchylenie standardowe wynosiło średnio jedynie  $0,14 \text{ mag/arcsec}^2$ . Nieco większe odchylenie standardowe średniej wartości pomiarowej widoczne jest podczas zmiennych warunków pogodowych i wynosi wtedy niecałe  $0,30 \text{ mag/arcsec}^2$  (Karpińska i Kunz 2022).

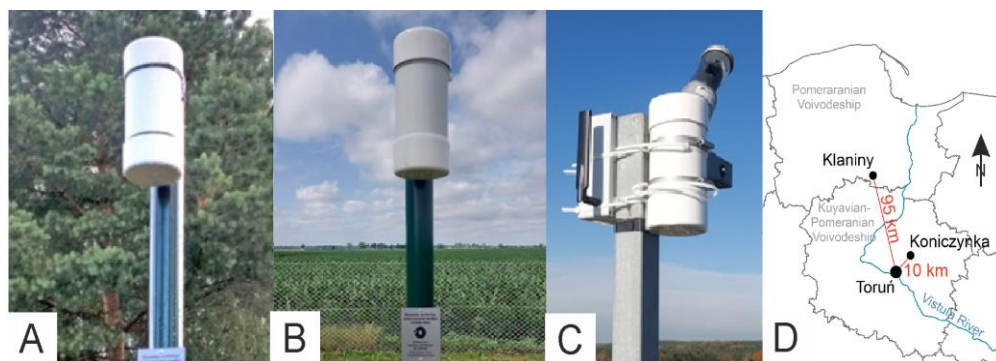
### **Tło pomiarowe jako wspomagające wartości referencyjne**

Pomiary jakości świetlnej nocnego nieba, zwłaszcza w obszarach zurbanizowanych, wymagają poznania jak największej liczby zmiennych. Aby poprawnie interpretować wyniki, pozyskane w ramach sieci pomiarowej, konieczna jest znajomość poziomu zanieczyszczenia światłem poza terenami zabudowanymi, czyli potencjalnymi źródłami zewnętrznego oświetlenia. W tym celu, jako tło pomiarowe założone zostały dodatkowe stanowiska pomiarowe znajdujące się w przyjętej odległości od granic miasta Torunia (Tabela 2). Na każdym z nich umieszczono na wysokości 2 metrów nad poziomem gruntu fabryczny fotometr SQM-LU (ryc. 8). Pierwszy z nich zamontowano na terenie Zintegrowanej Stacji Monitoringu Środowiska Przyrodniczego WNoZiGP UMK w Koniczynie, oddalony w linii prostej od granic miasta o około 10 km. Na terenie stacji prowadzonych jest szereg pomiarów parametrów środowiskowych, w tym gleb, wód i powietrza. Drugie urządzenie umieszczono w największym

kompleksie leśnym w Polsce – Borach Tucholskich w gminie Osieczna na terenie małej osady śródleśnej Klaniny. To miejsce oddalone w linii prostej o około 100 km na północ od Torunia, leży poza oddziaływaniem większych miast i terenów przemysłowych. Identyczne urządzenie pomiarowe znajduje się także na tarasie obserwacyjnym WNoZiGP UMK i z tego względu układ przestrzenny tych rejestratorów powinien uwzględniać malejący gradient oddziaływania człowieka (ryc. 8d).

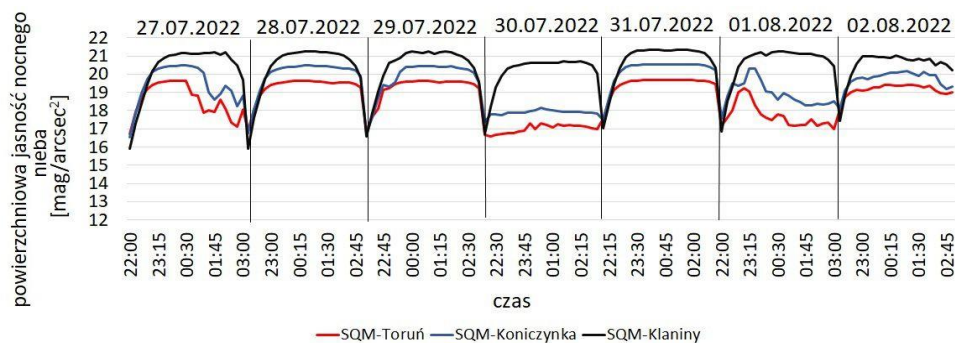
Tabela 2. Wykaz punktów stanowiących tło pomiarowe dla monitoringu miasta Torunia.

Lp.	Położenie urządzenia	Rozpoczęcie rejestracji	Wysokość nad gruntem	Współrzędne geograficzne
1	Stacja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego WNoZiGP UMK w Koniczynie, gmina Łysomice, województwo kujawsko-pomorskie	czerwiec 2022	2 metry	53,080614 N 18,684068 E
2	Bory Tucholskie, osada śródleśna Klaniny, gmina Osieczna, województwo pomorskie	lipiec 2022	2 metry	53,828586 N 18,203112 E



Ryc. 8. Stanowiska pomiarowe z fotometrem SQM-LU stanowiące tło pomiarowe dla miasta Torunia: a) Klaniny (Bory Tucholskie), b) Koniczynka, c) taras obserwacyjny WNoZiGP UMK w Toruniu oraz d) ich schematyczna lokalizacja (fot: Mieczysław Kunz).

Przyjęte założenie zostało pozytywnie zweryfikowane już po analizie wyników z pierwszego półrocza, tj. z okresu lipiec – grudzień 2022 roku, równoczesnej rejestracji na założonych stanowiskach referencyjnych. Przebieg krzywych prezentujących jasność nocnego nieba jest wyraźnie zależny od odległości liniowej od większych skupisk ludzkich a mierzona wielkość rośnie wraz z malejącym gradientem oddziaływania człowieka (ryc. 9).



Ryc. 9. Wyniki porównawcze wartości jasności nocnego nieba wykonane urządzeniem SQM na trzech stanowiskach pomiarowych położonych w malejącym gradiencie oddziaływania człowieka.

## Pomocnicze etapy realizacji projektu

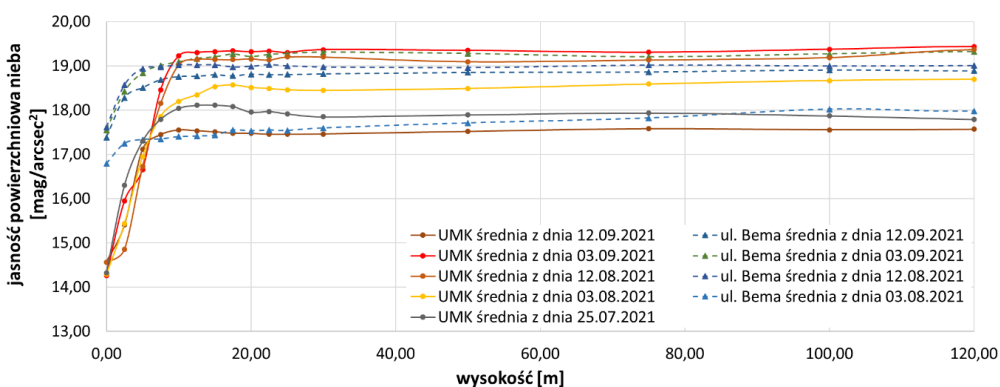
### Analiza zasięgu sygnału sieci LoRa w przestrzeni trójwymiarowej

Uzupełniającym, ale niezwykle ważnym z praktycznego punktu widzenia, zrealizowanym równocześnie działaniem był eksperyment terenowy, służący sprawdzeniu jakości i siły sygnału wybranej wcześniej technologii przesyłania danych (Karpińska i Kunz 2021, 2021a). Było to konieczne z punktu widzenia prac projektowych dotyczących zaplanowania i rozmieszczenia urządzeń pomiarowych w zasięgu bram dostępowych na obszarze miasta. W tym celu przeprowadzono testy na terenie bielańskiego kampusu Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu z wykorzystaniem zewnętrznej bramy komunikacyjnej zamontowanej na tarasie obserwacyjnym WNoZiGP UMK. Zasięg i jakość sygnału sieci LoRa sprawdzona została z wykorzystaniem testera sieci LoRaWAN mDOT Box firmy MultiTech Inc. W celach porównawczych i poznawczych testy terenowe zrealizowano z wykorzystaniem dwóch anten różnej długości, mniejszej 34 cm oraz ponaddwukrotnie dłuższej, 82 cm.

Przeprowadzone pomiary terenowe wykazały, że założona na obszarze kampusu UMK w Toruniu sieć LoRaWAN spełnia opracowane założenia projektowe. Zauważono jednak znaczną różnicę w jakości dostępnego sygnału przy korzystaniu z różnej długości anten. Przy zastosowaniu dłuższej, zasięg widoczności sygnału sieci obejmował cały obszar uniwersytetu, a także obszary oddalone w linii prostej od bramy komunikacyjnej nawet o odległość około 4 km. Co warto podkreślić, zasięg ten był uzyskiwany także w teoretycznie martwych polach, czyli za przeszkodami terenowymi, jak wysokie budynki czy obniżenia terenu. Pozyskana podczas powyżej opisanych działań wiedza pozwoliła na uwzględnienie tej informacji w planowaniu docelowym rozkładu przestrzennego punktów pomiarowych na terenie miasta.

## Pomiar zmienności jasności powierzchniowej nocnego nieba w gradiencie pionowym

Kolejnym działaniem uzupełniającym, służącym założeniu wielostanowiskowej sieci pomiarowej na obszarze miasta oraz poznaniu pionowej zmienności mierzonej jasności nieba było zbadanie, jaki wpływ na prawidłowość realizowanych pomiarów ma wysokość nad poziomem gruntu umieszczenia samych rejestratorów. W tym celu wykonano wertrykalne pomiary jasności nocnego nieba przy wykorzystaniu bezzałogowego statku powietrznego (BSP) firmy DJI model Matrice 210 RTK (Karpińska i Kunz 2023). W skonstruowanym urządzeniu pomiarowym opisanym powyżej wprowadzono niezbędne zmiany konstrukcyjne, tak aby możliwe było jego zamocowanie od góry drona i docelowy pomiar w kierunku zenitalnym. Zmienione zostało położenie czujnika światła, który przeniesiono na boczną część obudowy urządzenia w stosunku do prototypu, a programowo zwiększono częstotliwość odczytów do 15 sekundowych interwałów. Badania zmienności jasności powierzchniowej nocnego nieba w gradiencie pionowym, w wybranych przedziałach do wysokości maksymalnej 120 metrów wykonano na dwóch stanowiskach zlokalizowanych w Toruniu, w tym jednym na terenie kampusu UMK, a drugim przy ulicy Bema. Każda sesja pomiarowa zakładała lot dronem pionowo w górę i realizację pomiarów na ustalonych wysokościach, do 30 metrów co 2,5 metra i powyżej tej wysokości co 25 metrów. Przeprowadzone badania wykazały (ryc. 10), iż pomiary powierzchniowej jasności nocnego nieba stabilizują się powyżej wysokości lamp ulicznych (Karpińska i Kunz 2023).



Ryc. 10. Prezentacja wyników, obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym z wykorzystaniem BSP, otrzymanych na stanowisku pomiarowym zlokalizowanym na parkingu UMK w Toruniu.

Przekraczając tą granicę zmierzone wartości przyjmują stałą maksymalną wartość. Przeprowadzone badania pozwoliły na ustalenie, iż wykonywane

pomiary do wysokości 10 metrów nad gruntem, a w szczególności realizowane w pobliżu intensywnej oświetleniowej infrastruktury ulicznej, obarczone są dodatkowym błędem wynikającym z obecności bezpośrednio padającego kierunkowo, światła otaczających lamp. Praktyczny wniosek z tych działań był taki, iż stanowiska pomiarowe w ramach sieci monitoringowej można montować na różnych wysokościach nad poziomem gruntu, ale powinny się znajdować poza wpływem bezpośredniego promieniowania. W przeciwnym wypadku uzyskiwane wyniki mogą być nieznacznie zawyżone.

## **Sieć monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem**

### **Miejska sieć pomiarowa – teoretyczny model rozkładu przestrzennego stanowisk pomiarowych**

Kolejnym ważnym elementem działań służących do zaprojektowania docelowego modelu sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem w Toruniu było ustalenie optymalnej liczby urządzeń rejestrujących, koniecznych do pełnego pokrycia nieba w granicach administracyjnych miasta. Obszar, z którego zbierane są dane pomiarowe przetwarzane przez pojedynczy czujnik światła, ograniczony jest w szczególności kątem jego widzenia oraz występującym nad nim zachmurzeniem, zwłaszcza jego wysokością w ramach przyjętych pięter zalegania. W celu analizy ostatnio wymienionego czynnika szczegółowo przetworzone zostały dane meteorologiczne z dwuletniego okresu 2019–2020 zarejestrowane przez IMGW na Stacji Pomiarowej Toruń – Wrzosey (Karpińska i Kunz 2022a, 2022b). Analizy wykazały, że najczęściej występującą w porze nocnej wysokością chmur była wartość między 50 a 250 metrów. W tych dwóch latach ponad 28% nocy było całkowicie zachmurzonych, a prawie połowę wszystkich nocy cechowało zachmurzenie w mniejszym lub większym stopniu. W całym okresie 25% nocy pozostawało bezchmurnych. Średnia wysokość zalegania chmur dla tego okresu wyniosła 1 013 metrów nad poziomem gruntu. Dzięki znajomości specjalnie dobranego kąta bryłowego, w którym zbierane są dane przez czujnik światła wykorzystywany w urządzeniu rejestrującym (Adafruit 2019) oraz wykorzystaniu charakterystyk statystycznych dotyczących zachmurzenia, możliwe było wykonanie symulacji zakresu widoczności przestrzennej zbudowanego urządzenia (Karpińska i Kunz 2022b) wraz z określeniem ich zagęszczenia do pełnego pokrycia obszaru analizy.

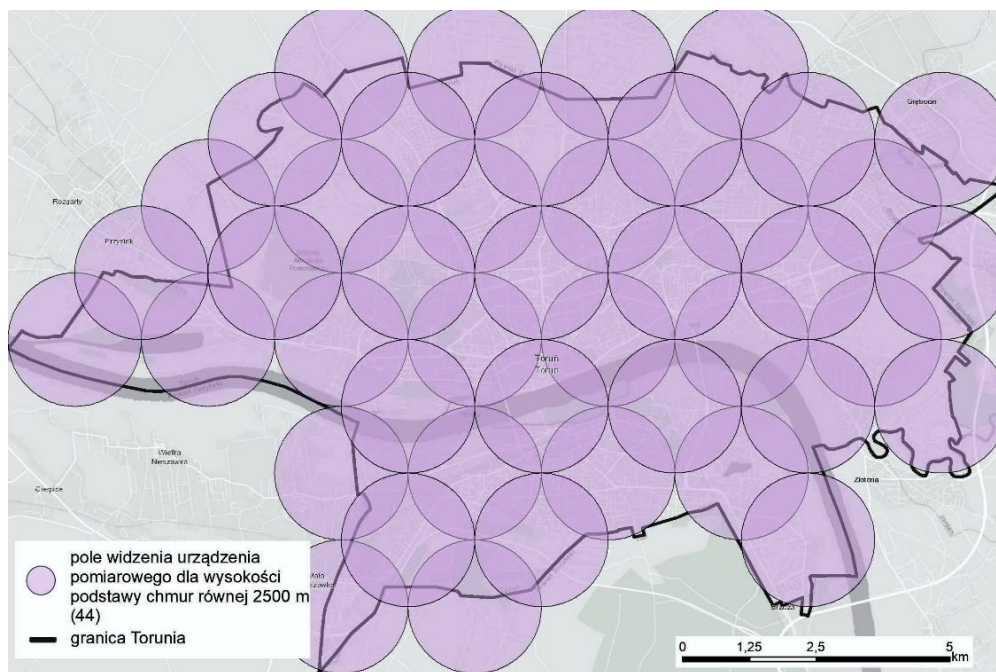
Teoretyczny model rozkładu stanowisk pomiarowych dla Torunia opracowano dla wysokości chmur 200, 1 000 oraz 2 500 metrów nad poziomem gruntu. Przyjęte wartości związane są z najczęściej występującą wysokością podstawy chmur, ich średnią wysokością oraz dolnym przedziałem wysokości



występowania chmur dla warstwy średniej, czyli typowych rodzajów chmur Altostratus i Altocumulus (Karpińska i Kunz 2022b).

Wykonana symulacja wykazała, że dla pełnego, pokrywającego się przestrzennie monitoringu nocnego nieba w Toruniu i przyjętych trzech wysokości zalegania chmur, konieczne byłoby przygotowanie i rozmieszczenie odpowiednio 5 700, 230 oraz 44 stanowisk pomiarowych. W dalszych rozważaniach uznano jednak, iż zbieranie danych przez 5 700 czy 230 stanowisk pomiarowych w nocy o małym zachmurzeniu lub bez zachmurzenia byłoby nieekonomiczne oraz nieuzasadnione poznawczo, a przede wszystkim generowałyby bardzo dużą liczbę powtarzających się danych, niewnoszących dodatkowych informacji o rozkładzie przestrzennym zjawiska.

Przeprowadzone symulacje pokazały, iż optymalnym rozwiązaniem dla Torunia, uwzględnianym zarówno dla nocy bezchmurnych, jak i całkowicie zachmurzonych (częstotliwość obu sytuacji w kalendarzowego ciągu roku jest zbliżona) jest przyjęcie liczebności stanowisk pomiarowych na poziomie około 40 przy założeniu ich równomiernego rozmieszczenia. Taki teoretyczny model rozkładu przestrzennego stanowiska prezentuje rycina 11.



Ryc. 11. Teoretyczny model rozkładu przestrzennego stanowisk pomiarowych w Toruniu (objaśnienie w tekście).

Przyjęcie powyższego założenia pozwoliło na próbę określenie rzeczywistej odległości liniowej w jakiej powinny znajdować się względem siebie w terenie stanowiska pomiarowe, aby najbardziej optymalnie i efektywnie zbierać dane dotyczące zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba.

W praktyce operacyjnej okazuje się jednak, iż przy planowaniu kolejnych stanowisk pomiarowych należy przede wszystkim wziąć pod uwagę inne czynniki i uwarunkowania, z których najważniejsze to omówiona w poprzedzającym podrozdziale widoczność sygnału sieci LoRaWAN. Kluczowa jest również odpowiednia infrastruktura techniczna, która pozwala na trwałe i bezpieczne zamontowanie urządzenia rejestrującego i późniejszy dostęp do niego w celach konserwacyjnych i użytkowych. Okazuje się, że stopień pokrycia danego obszaru siecią LoRa możemy próbować zagęszczać montując dodatkowe bramy dostępowe (zobacz rycina 13), to wybór miejsc montażu czujników jest już mocno ograniczony.

### **Miejska sieć pomiarowa – stan zaawansowania w praktyce**

Wdrożenie sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem na terenie Torunia, na podstawie opracowanego wcześniej modelu teoretycznego i przyjętej koncepcji, okazało się bardzo złożonym zadaniem, trudnym do realizacji w praktyce. Konieczne było przy tym przeprowadzenie dodatkowych działań w celach modyfikacji i optymalizacji założeń projektowych, a także podpisania opisanych w rozdziale porozumień międzyinstytucjonalnych.

Obecnie udało się założyć i skutecznie włączyć do tworzonego miejskiego systemu monitoringu już 24 stanowiska pomiarowe (stan na sierpień 2023), a ich liczba systematycznie się zwiększa. Wybrane ich parametry oraz lokalizację w Toruniu prezentuje Tabela 3. Z podanego wykazu wynika, że 7 stanowisk pomiarowych zaczęło funkcjonować jeszcze w 2021 roku, 13 w roku następnym, a kolejne 4 w 2023 roku. Oznacza to, że w przypadku niektórych obszarów dostępna jest już ponad dwuletnia ciągła seria obserwacyjna, która umożliwia wykonywanie wybranych analiz, generowanie statystyk i wnioskowanie o lokalnym poziomie, sile i zakresie przestrzennym omawianego zjawiska. To prawdopodobnie pierwsze tak szczegółowe i z tak długiej oraz spójnej serii czasowej dane pomiarowe dostępne z obszaru Polski.

Rozmieszczenie przestrzenne w Toruniu działających już w systemie monitoringu miejskiego stanowisk pomiarowych wraz z umiejscowieniem planowanych do uruchomienia w najbliższym czasie kolejnych rejestratorów przedstawia rycina 12. Natomiast istniejące oraz planowane w przyszłości lokalizacje bram komunikacyjnych sieci LoRa (Tabela 4) obrazuje rycina 13.

Tabela 3. Charakterystyka funkcjonujących stanowisk pomiarowych w ramach miejskiej sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem.

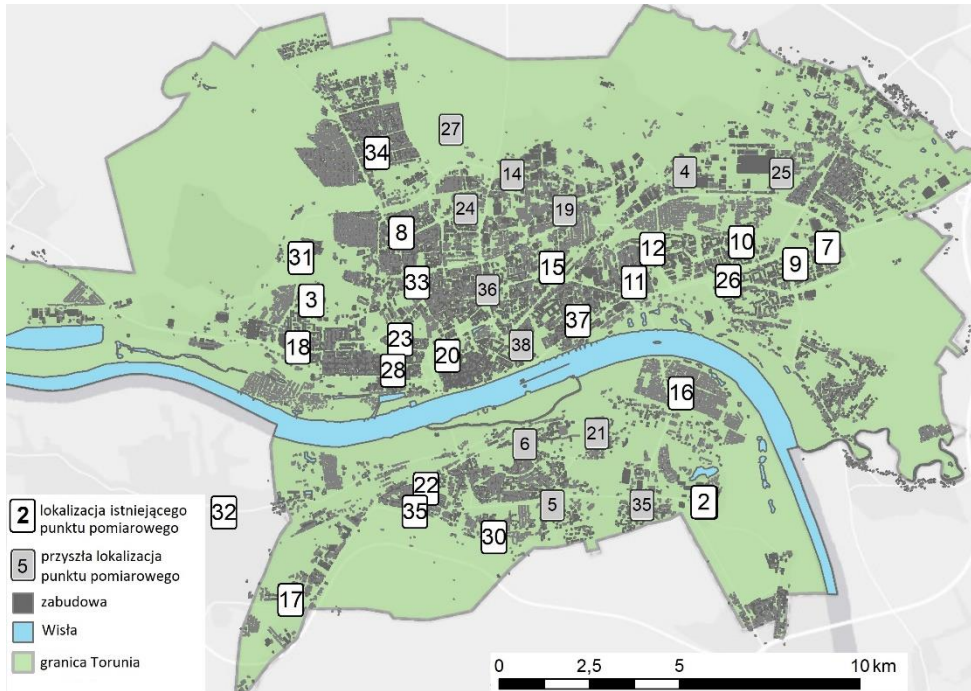
Lp.	ID urządzenie	Lokalizacja	Rozpoczęcie rejestracji	Miejsce montażu	PUWG 1992	
					X	Y
1	3	ul. Lwowska	16.02.2021	3 piętro	471081	572962
2	7	Szosa Lubicka	30.03.2022	3 piętro	479709	573793
3	8	Szosa Chełmińska	30.03.2022	3 piętro	472596	574073
4	9	ul. Witosa	12.07.2022	3 piętro	479172	573518
5	10	ul. Niesiołowskiego	13.02.2022	1 piętro	478272	573893
6	11	ul. Kalinowa	02.04.2022	parter	476479	573234
7	12	ul. Rydygiera	30.03.2022	9 piętro	476787	573790
8	15	ul. Łokietka	09.05.2023	8 piętro	475105	573485
9	16	ROD Rudak	30.05.2022	parter	477252	571388
10	17	ul. Szubińska	05.06.2022	1 piętro	470709	567977
11	18	ul. Fałata	12.11.2021	2 piętro	470857	572180
12	20	Plac Teatralny	17.08.2023	5 piętro	473356	572024
13	22	ul. Drzymały	30.03.2022	4 piętro	472981	569815
14	23	ul. Matejki	11.08.2021	10 piętro	472569	572304
15	26	ul. Konstytucji 3 Maja	13.01.2023	7 piętro	478050	573251
16	28	ul. Matejki	02.04.2022	4 piętro	472446	571787
17	29	ul. Włocławska	18.05.2021	5 piętro	477643	569560
18	30	ul. Łączna	29.03.2022	3 piętro	474117	569002
19	31	ul. Makuszyńskiego	15.01.2022	parter	470913	573672
20	32	ul. Dębowa	03.09.2021	parter	469599	569438
21	33	ul. Końcowa	28.07.2021	4 piętro	472853	573245
22	34	ul. Kwiatowa	12.10.2021	1 piętro	472196	575407
23	35	ul. Okólna	30.12.2022	1 piętro	472799	569435
24	37	ul. Targowa	17.08.2023	8 piętro	475533	572599

Tabela 4. Charakterystyka uruchomionych bram dostępowych w ramach miejskiej sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem.

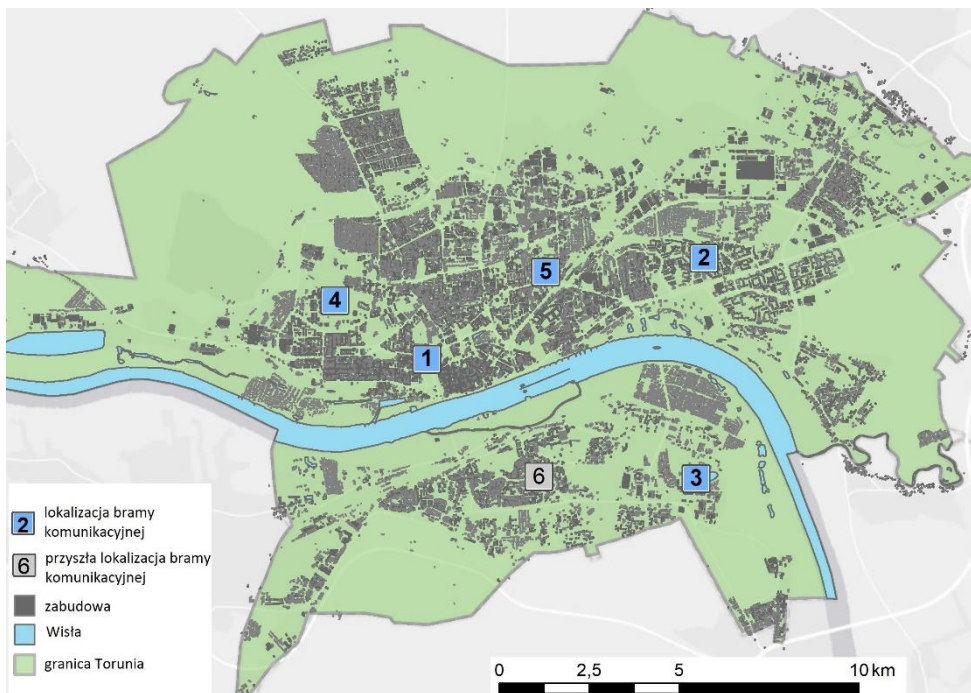
Lp.	Typ	Lokalizacja	Rozpoczęcie rejestracji	Miejsce montażu	PUWG 1992	
					X	Y
1	zewnętrzny	ul. Matejki	lipiec 2021	10 piętro	472569	572295
2	zewnętrzny	ul. Jamontta	luty 2022	5 piętro	478088	573608
3	wewnętrzny	ul. Włocławska	kwiecień 2020	4 piętro	477590	569579
4	wewnętrzny	ul. Lwowska	luty 2021	3 piętro	471064	573050
5	zewnętrzny	ul. Łokietka	maj 2023	8 piętro	475105	573485

Obecnie na obszarze Torunia zamontowano 5 bram dostępowych do sieci LoRaWAN. Są one w pełni operacyjne i mogą także służyć innym użytkownikom korzystającym z urządzeń i technologii *Internetu Rzeczy* (IoT). Trzy z tych bram są typowo zewnętrznymi, a dwie wewnętrznymi z modulowanymi antenami wzmacniającymi sygnał. Dodatkowo przygotowywana jest do montażu kolejna zewnętrzna brama dostępowa, która zostanie dodana do systemu w najbliższym czasie, tak aby zwiększyć sygnał sieci w lewobrzeżnej części miasta (ryc. 13).





Ryc. 12. Rozmieszczenie aktualnych oraz planowanych stanowisk pomiarowych w Toruniu w ramach sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba światłem.



Ryc. 13. Rozmieszczenie aktualnych oraz planowanych do założenia bram dostępnych w Toruniu w ramach sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba światłem.

Dzięki temu będzie już pełny i stabilny zasięg sygnału sieci dostępowej oraz możliwość montażu w potencjalnie większej liczbie lokacji kolejnych stanowisk pomiarowych w ramach zagęszczania sieci zgodnie ze schematem pokazanym na rycinie 11.

### **Miejska sieć pomiarowa – najbliższa przyszłość projektu**

Założona i działająca na obszarze Torunia sieć monitoringu zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba jest dzisiaj w pełni operacyjna i będzie rozbudowywana o kolejne urządzenia pomiarowe, zgodnie z przedstawionym schematem czasowym i zakresem przestrzennym. Równolegle, w trakcie realizacji tego projektu, udoskonalane jest technicznie i funkcjonalnie skonstruowane urządzenie pomiarowe do wersji bardziej kompaktowej i otwartej na rozbudowę o dodatkowe zakresy spektralne rejestracji jasności nocnego nieba, a także o inne czujniki środowiskowe. Wszystkie te działania zmierzają w stronę zaprojektowania nowego, ulepszanego urządzenia pomiarowego, które dzięki rozbudowie sfery czujnikowej będzie mogło kompleksowo monitorować stan środowiska przyrodniczego. Takie urządzenie będzie jednak musiało przejść przez wszystkie opisane w tym rozdziale etapy, procedury i działania.

Niezależnie od powyższego, finalizowane są prace nad aplikacją służącą wizualizacji danych przestrzennych gromadzonych w ramach rozbudowywanej miejskiej sieci monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba oraz ich skutecznej archiwizacji. Dzięki temu każdy zainteresowany mieszkaniec miasta będzie mógł zobaczyć bieżący i archiwalny, w przyjętych poziomach czasowych, rozkład przestrzenny i statystyczny zjawiska smogu świetlnego zarówno punktowo, jak i powierzchniowo na podstawie interpolacji wszystkich wartości.

### **Dyskusja i podsumowanie**

W rozwijającym się technologicznie świecie i przy świadomych działaniach człowieka ukierunkowanych na ochronę środowiska, każdy monitoring jego stanu i parametrów jest ważny i dostarcza wiarygodnych danych, a także przekonujących argumentów za jego prowadzeniem i rozbudową. Źródeł zanieczyszczeń środowiska o genezie antropogenicznej wpływających negatywnie na nasze zdrowie i funkcjonowanie jest coraz więcej oraz są one bardziej intensywne. Do tej grupy współcześnie należy, wcześniej niebrane pod uwagę, zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba. Zjawisko to przez swoją intensyfikację oraz nieprowadzenie wcześniej szeroko zakrojonych badań nad jego zmiennością, charakterem i wpływem na organizmy żywe, wymaga dzisiaj stałego monitoringu oraz ukierunkowanych, interdyscyplinarnych działań poznawczych.

Zanieczyszczenie nocnego nieba sztucznym światłem, podobnie, jak inne obserwowane zjawiska spowoduje działalnością człowieka, ma istotny wpływ na zdrowie, jakość życia, funkcjonowanie i samopoczucie mieszkańców obszarów zurbanizowanych. Zaprojektowanie, zbudowanie i późniejsze utrzymanie rozproszonej sieci pomiarowej na większym obszarze, dostarczającej wielotematycznej informacji o wybranych parametrach środowiskowych jest bardzo istotnym działaniem służącym lepszemu poznaniu zjawiska, jego zmienności i określeniu wpływu na wybrane elementy przyrody ożywionej, w tym także człowieka.

Opisany w niniejszym rozdziale system automatycznej sieci monitoringu zbierającej rozproszone dane o powierzchniowej jasności nocnego nieba w Toruniu jest dzisiaj w pełni operacyjny, a bieżące dane pomiarowe systematycznie pozyskiwane i archiwizowane. System ten będzie rozbudowywany w kolejnych okresach o nowe funkcjonalności, możliwości oraz stanowiska pomiarowe. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można powiedzieć, że realizowany projekt jest złożonym działaniem, wymagających realizacji wielu pobocznych badań i wątków. W ich toku ustalone zostały konieczne parametry do wykonywania wiarygodnych pomiarów powierzchniowej jasności nocnego nieba za pomocą sieci LoRaWAN. Dla właściwego poznania zjawiska zanieczyszczenia nieba sztucznym światłem niezbędna jest także realizacja wielotematycznych i wielowątkowych przetworzeń i analiz wszystkich zbieranych danych. Uzyskane wyniki i na ich podstawie formułowane wnioski mogą być pomocne zarówno obywatelom, grupom naukowym, a zwłaszcza jednostkom samorządowym wszystkich szczebli w odniesieniu do możliwości racjonalnego gospodarowania energią elektryczną, w tym realizacji przemyślanego procesu modyfikacji zewnętrznego oświetlenia ulicznego, co z pewnością przyczyni się do istotnych oszczędności w bieżącej sytuacji rosnących cen prądu.

Opracowany system pomiarowy, wraz z bezprzewodową infrastrukturą komunikacyjną oraz aplikacją do wizualizacji i udostępniania danych pomiarowych, umożliwia pomiar i monitoring natężenia oświetlenia zewnętrznego środowiska miejskiego w długim horyzoncie czasowym. Urządzenia, wykorzystując standard bezprzewodowej wymiany danych LoRaWAN, realizują przyszłościową jeszcze w naszym kraju koncepcję *Internetu Rzeczy* wpisując się w ideę *Smart Cities* w obszarze *Smart Environment*.

Kolejne, pilotażowe stanowiska pomiarowe, w oparciu o zaprojektowane urządzenia rejestrujące, mogą zostać umieszczone w dowolnej lokalizacji, w której dostępna jest infrastruktura sieci LoRaWAN. W województwie

kujawsko-pomorskim takie możliwości pojawiły się w Bydgoszczy oraz Grudziądzu i te dwa miasta planowane są do włączenia w ramach programu monitoringu zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba. Dzięki temu zwiększona zostanie skala przestrzenna obserwacji, a wartością dodaną będzie z pewnością aspekt edukacyjny realizowany wśród mieszkańców tych ośrodków miejskich zainteresowanych wynikami rejestracji.

## **Podziękowania**

Autorzy rozdziału składają podziękowania Panu Piotrowi Józefiakowi z TARR S.A. IoT North Poland Hub w Toruniu za umożliwienie realizacji etapu demonstratora technologii na terenie Toruńskiego Parku Technologicznego oraz za systematyczną inspirację w zakresie rozbudowy tworzonego systemu monitoringu. Panu Krzysztofowi Niedzieli z EXEA Sp. z o.o. Centrum Przetwarzania Danych dziękujemy za okazaną pomoc techniczną dotyczącą konfiguracji bram dostępowych sieci LoRa oraz za udostępnienie przestrzeni serwerowej. Pracownikom Obserwatorium Meteorologicznego Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK dziękujemy za umożliwienie opisanych w rozdziale wybranych działań i testów na tarasie obserwacyjnym.

## **Literatura**

- Adafruit, 2019. *Adafruit TSL2591*. High Dynamic Range Digital Light, Adafruit Learning System.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2.
- Garcia-Saenz A., Sanchez de Miguel A., Espinosa A., Crespo A., Aragonés N., Llorca J., Amiano P., Martín V., Guevara M., Capelo R., Tardón A., Peiró R., Jiménez-Moleón J., Roca Barcelo A., Perez-Gomez B., Dierssen-Sotos T., Fernández T., Moreno-Iribas C., Moreno V., Kogevinas M., 2018. Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain. *Environmental Health Perspectives* 126.
- 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., 2017. Measuring night sky brightness: Methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 205: 278–290.
- Jechow A., Kyba C.C.M., Kolláth Z., Lerner A., Hänel A., Shashar N., Hölker F., 2017a. Measuring light pollution with fisheye lens imagery from a moving boat, a proof of concept. *International Journal of Sustainable Lighting* 36(1): 15–255.
- Karpińska D., Kunz M., 2023. Vertical variability of night sky brightness in urbanised areas. *Quaestiones Geographicae* 42(1): 5–14.
- Karpińska D., Kunz M., 2022. Device for automatic measurement of light pollution of the night sky. *Scientific Reports* 12: 16476.

- Karpińska D., Kunz M., 2022a. Dependence of the surface brightness of the night sky on meteorological conditions. [in:] Pawley M. (ed.), *Light Pollution: Theory, Modelling and Measurements International Conference "Challenges in LPTMM: the next ten years"*, Santiago de Compostela, June 21–24, 2022. Santiago de Compostela, Universidade de Santiago de Compostela: 22–22.
- Karpińska D., Kunz M., 2022b. Optymalizacja rozmieszczenia sieci pomiarowej do monitoringu zanieczyszczenia światłem nocnego nieba na przykładzie Torunia. [w:] Młynarczyk A. (red.), *Środowisko przyrodnicze jako obszar badań*. Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań: 9–24.
- Karpińska D., Kunz M., 2021. 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* 54: 137–149.
- Karpińska D., Kunz M., 2021a. Rekonstrukcja zasięgu widoczności sieci LoRaWAN na terenie kampusu UMK w Toruniu. [w:] Młynarczyk A. (red.), *Środowisko przyrodnicze, jako obszar badań*. Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań: 47–60.
- Karpińska D., Kunz M., 2020. Analysis of light pollution of the night sky in Toruń (Poland). *Civil and Environmental Engineering Reports* 30(4): 155–172.
- Karpińska D., Kunz M., 2019. Light pollution in the night sky of Toruń in the summer season. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 17: 91–100.
- Kocifaj M., Bará S., 2020. Nighttime monitoring of the aerosol content of the lower atmosphere by differential photometry of the anthropogenic skyglow. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 500: 47–51.
- Kolláth Z., 2010. Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park. *Journal of Physics Conference Series* 218(1): 012001.
- Kołomański S., 2015. Zanieczyszczenie światłem i ciemność. [w:] Wiśniewska M.R., Tomasik K. (red.), *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, Wyd. UW, Warszawa: 29–46.
- Linares H., Masana E., Ribas S.J., Aubé M., Simoneau A., Bará S., 2020. Night sky brightness simulation over Montsec protected area. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 249.
- Longcore T., Rich C., DelBusso L., 2017. Artificial Night Lighting and Protected Lands. *Natural Resource Report NPS/NRSS/NSNS/NRR-2017/1493*.
- Mikhaylov K., Stusek M., Masek P., Petrov V., Petäjäjärvi J., Andreev S., Pokorny J., Hosek J., Pouttu A., Koucheryavy Y., 2018. *Multi-RAT LPWAN in Smart Cities: Trial of LoRaWAN and NB-IoT Integration*. IEEE International Conference on Communications (ICC): 1–6.
- Light pollution reduction measures in Europe, 2022*. Working paper for international workshop "Light Pollution 2022", during the Czech Presidency of the Council of the European Union, Ministry of the Environment of the Czech Republic, 60 p.
- Pun C.S.J., So C.W., Leung W.Y., Wong C.F., 2013. 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* 139: 90–108.
- Ribas S., Torra J., Figueras F., Paricio S., Canal-Domingo R., 2016. How clouds are amplifying (or not) the effects of ALAN. *International Journal of Sustainable Lighting* 18.
- Semtech Corporation, 2015. *AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Wireless Sensing and Timing Products*, Application Note.
- Szlachetko K. (red.), 2022. *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego*. Instytut Metropolitalny, Gdańsk, 48 s.
- Ścieżor T., 2020. The impact of clouds on the brightness of the night sky. *Journal of Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer* 247.
- Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., 2010. Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej. *Inżynieria Środowiska* 388. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków.

## Streszczenie

Zanieczyszczenie nocnego nieba sztucznym światłem stało się istotnym elementem krajobrazu współczesnego miasta. Spadek jakości obserwowanego w nocy nieboskłonu jest zauważany już nawet przez nieświadomych jego genezy mieszkańców większych skupisk ludzkich. W pełni rozgwieżdżonego nieba nie widać dzisiaj powszechnie nawet w miejscach oddalonych od wielkich aglomeracji czy mniejszych miast. Coraz więcej miejsc traci dostęp do naturalnego wcześniej przywileju obserwacji ciemnego nieba, a ich mieszkańcy dodatkowo narażeni są już w sposób systematyczny na wszystkie pośrednie i bezpośrednie negatywne skutki tego zjawiska. Monitorowanie jasności nocnego nieba staje się aktywnością coraz większej liczby interdyscyplinarnych grup badawczych zawiązywanych na całym świecie, w tym także i w Polsce. W Toruniu pierwsze pomiary wielkości tego zjawiska wraz z określeniem jego skali przestrzennej z wykorzystaniem ręcznych urządzeń rozpoczęto w 2017 roku. W następnych latach starano się udoskonalić proces pozyskania danych tworząc prototyp – demonstrator technologii i w konsekwencji wersję produkcyjną automatycznego urządzenia mierzącego powierzchniową jasność nocnego nieba. Rozdział przedstawia etapy realizacji projektu służące opracowaniu systemu monitoringu zanieczyszczenia nocnego nieba, który jest konsekwentnie wdrażany w Toruniu. Najważniejszym składnikiem tego systemu jest własnej konstrukcji urządzenie pomiarowe. Zaprojektowany i funkcjonujący w Toruniu, począwszy od 2019 roku system monitoringu, jest rozwijany o nowe elementy i systematycznie dodawane kolejne stanowiska pomiarowe zagęszczając miejską sieć obserwacyjną. Zbudowane urządzenia wykorzystujące standard bezprzewodowej wymiany danych z wykorzystaniem LoRa realizują koncepcję *Internetu Rzeczy* wpisując się w założenia inteligentnego miasta (*Smart City*).

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, pomiary automatyczne, Przemysł 4.0, monitoring, LoRa, inteligentne miasto, Toruń.

## **Measuring light pollution in the night sky – from technology demonstrator technology to monitoring system**

### **Summary**

Pollution of the night sky by artificial light has now become an important element of the modern city landscape. The decline in the quality of the sky observed at night in urban areas has already been noticed even by residents unaware of its origin. A starry sky is nowadays not easy to observe even in places far from large conurbations or smaller cities. More and more places are losing access to the previously natural privilege of observing the dark sky, and their inhabitants are thus systematically exposed to all the direct and indirect negative effects of this phenomenon. Monitoring the brightness of the night sky is gaining interest from a growing number of interdisciplinary research groups being established around the world, including Poland. In Toruń, the first measurements of the magnitude of this phenomenon, together with the determination of its spatial scale, were started using handheld devices in 2017. In the following years, efforts were made to improve the data acquisition process by creating a prototype – a technology demonstrator and, consequently, a commercial version of an automatic device measuring the surface brightness of the night sky. This paper presents the stages of the project aimed at developing a light pollution monitoring system, which has been consistently implemented in Toruń. The most important component of this system is a measuring device of our own design and construction. The monitoring system designed and operating in Toruń, starting in 2019, is being further developed with new components and monitoring (measurement) sites being systematically added, making the city's observation network increasingly dense. The devices built using the LoRa standard for wireless data exchange implement the concept of the Internet of Things, fitting in with the objectives of a smart city.

**Key words:** light pollution, automatic measurement, Industry 4.0, monitoring system, LoRaWAN, Smart City, Toruń.

### **Dane kontaktowe autorów:**

#### **Dominika Karpińska**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: karpinskadominika@doktorant.umk.pl

#### **Mieczysław Kunz**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: met@umk.pl

Przemysław Tabaka, Tomasz Ścieżor

## **Wpływ użytego luksomierza na wyniki pomiarów wertykalnego natężenia oświetlenia na nieruchomościach mieszkalnych**

### **Wprowadzenie**

Powszechnie uważa się, że zachowania przestępcze zazwyczaj kojarzą się z ciemnością (Gaston i in. 2015). Słaba widoczność wzmaga poczucie zagrożenia. Można zatem stwierdzić, że oświetlenie publiczne wpływa na komfort i poczucie bezpieczeństwa mieszkańców. Oświetlenie zewnętrzne jest nieodzownym elementem dróg, chodników, ścieżek i placów na terenach osiedli mieszkaniowych. W ostatnim czasie oświetlenie postrzegane jest przez pryzmat ochrony środowiska. Z użytkowaniem oświetlenia zewnętrznego często wiąże się emisja strumienia świetlnego w kierunku obiektów, które nie są celem oświetlenia. Światło latarni zlokalizowanych w pobliżu nieruchomości mieszkalnych nierzadko przenika przez okna do wnętrza mieszkalnych i obiektów służby zdrowia (budynki mieszkalne, domy studenckie, szpitale itp.). W literaturze (Strzyżewski 2021) zjawisko to zostało nazwane emisją światła. Zbyt duże rozjaśnienie w porze nocnej pomieszczeń mieszkalnych może być źródłem dyskomfortu. Jak donosi literatura (Skwarło-Sońta 2015) ekspozycja na światło w porze nocnej niekorzystnie wpływa na organizm człowieka.

Podstawowym parametrem normatywnym opisującym stan oświetlenia jest natężenie oświetlenia. Wielkość ta definiowana jest w punkcie, który może znajdować się na powierzchni poziomej lub pionowej. Stąd rozróżnia się dwa terminy: horyzontalne oraz wertykalne natężenia oświetlenia. W przypadku oceny emisji światła kluczową rolę odgrywa wertykalne natężenie oświetlenia. Pomiarów natężenia oświetlenia zwykle dokonuje się za pomocą miernika



nazywanego luksomierzem. Najczęściej składa się on z dwóch elementów: z głowicy fotometrycznej oraz ze wzmacniacza z wyświetlaczem (nazywanym często przez producentów „jednostką sterującą”), choć ostatnimi czasy dostępne są luksomierze, w przypadku których cała „platforma pomiarowa” zamknięta jest w głowicy fotometrycznej, a wynik pomiaru wyświetlany może być na dołączonym panelu, tablicie czy komputerze. Konstrukcje luksomierzy są rozmaite. Nie zmienia to jednak faktu, że istotnym elementem mającym wpływ na wartość wielkości mierzonej jest głowica fotometryczna. Najważniejszymi wymaganiami stawianymi głowicom fotometrycznym są: charakterystyka czułości widmowej zbliżona do czułości widmowej ludzkiego oka (korekcja widmowa) oraz zależność natężenia oświetlenia z cosinusem kąta (korekcja przestrzenna). Niestety, w przypadku tańszych fotometrów krzywa czułości głowic fotometrycznych odbiega od wymaganej krzywej czułości ludzkiego oka (Tabaka i Wtorkiewicz 2022).

W celu dokonania oceny spełnienia lub nie spełnienia wymagań dotyczących immisji światła, można przeprowadzić stosowne obliczenia przy pomocy aplikacji wspomagającej proces projektowania oświetlenia (Skarżyński 2017) lub wykonać pomiary w terenie. Problematyka wpływu użytego luksomierza na wyniki pomiarów natężenia oświetlenia nie jest zagadnieniem nowym. Już wcześniej przeprowadzono badania eksperymentalne w odniesieniu do siedmiu luksomierzy, których głowice fotometryczne oświetlono źródłami światła o różnych charakterystykach spektralnych (Tabaka i Wtorkiewicz 2021). Walorem tego eksperymentu jest to, że można uwzględnić praktycznie dowolną liczbę źródeł światła, zachowując stałe warunki pomiaru. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że warunki laboratoryjne różnią się od sytuacji występujących w praktyce. W przypadku oświetlenia zewnętrznego odległości pomiędzy latarnią a powierzchnią okna, do którego dociera światło, są rzędu kilkunastu, a czasem nawet kilkudziesięciu metrów. W takim przypadku poza korekcją widmową istotną rolę zaczyna także odrywać korekcja przestrzenna. W warunkach laboratoryjnych nie sposób jest odtworzyć sytuacje występujące w praktyce, dlatego też autorzy zdecydowali się przeprowadzić pomiary terenowe, zwiększając przy tym także liczbę fotometrów.

### **Ograniczenia dotyczące światła przeszkadzającego**

Wartości graniczne światła przeszkadzającego, którego źródłem są instalacje oświetlenia zewnętrznego, podano w normie dotyczącej oświetlenia zewnętrznego, PN-EN 12464-2:2014-05 oraz w raporcie technicznym Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej CIE 150:2019. Uzależnione są one od strefy środowiskowej, oznaczonej symbolami: E0, E1, E2, E3, E4, a także

(w przypadku pionowego natężenia oświetlenia i światłości oprawy oświetleniowej) od pory dnia (Tabela 1). Najciemniejszym obszarem jest strefa środowiskowa E0, do której zalicza się rezerваты UNESCO, Parki Ciemnego Nieba IDA, natomiast najjaśniejszą jest E4, która dotyczy m.in. centrów miast, obszarów handlowych i komercyjnych. Z punktu widzenia tematu niniejszego rozdziału istotne znaczenie mają wartości pionowego natężenia oświetlenia na oknach nieruchomości (Tabela 1, kolumna 2). W przypadku nieruchomości mieszkalnych zlokalizowanych w centrach miast lub w pobliżu obszarów handlowych, zastosowanie mają wartości graniczne podane dla strefy środowiskowej E4. Oznacza to, że wertykalne natężenie oświetlenia na powierzchni okna budynku mieszkalnego nie powinno przekraczać odpowiednio: 25 lx przed ciszą nocną (określaną też jako „przed czasem przyciemniania”) i 5 lx po ciszy nocnej (po „czasie przyciemniania”). Określenie „cisza nocna” jest pojęciem umownym. Zwyczajowo są to godziny przyjęte na odpoczynek i zwykle obowiązują one pomiędzy 22:00 a 06:00. W normie PN-EN 12464-2:2014-05 nie podano godzin, do których odnosi się „czas przyciemniania”. Zapisano natomiast, że jest to „czas, w którym obowiązują ściśle wymagania (w zakresie światła przeszkadzającego); często natomiast warunki stosowania oświetlenia są ustalane i kontrolowane przez władze, zazwyczaj władze lokalne”.

Tabela 1. Maksymalne dopuszczalne światło przeszkadzające, którego źródłem są zewnętrzne instalacje oświetleniowe.

Strefa środowiskowa	Pionowe natężenie oświetlenia na oknach nieruchomości		Światłość oprawy oświetleniowej		Światło wypromieniowane w górę  <i>ULR</i> [%]	Luminancja średnia	
	$E_v$ [lx]		$I$ [cd]			na elewacji budynku	na powierzchni znaku (reklamy)
	przed ciszą nocną	po ciszy nocnej	przed ciszą nocną	po ciszy nocnej		$L_b$ [cd/m <sup>2</sup> ]	$L_s$ [cd/m <sup>2</sup> ]
E0	0	0	0	0	0	< 0,1	< 0,1
E1	2	0	2 500	0	0	< 0,1	50
E2	5	1	7 500	500	2,5	5	400
E3	10	2	10 000	1 000	5,0	10	800
E4	25	5	20 000	2 500	15	25	1 000

Kolejnym parametrem określającym maksymalne dopuszczalne światło przeszkadzające, jest graniczna wartość światłości w potencjalnie przeszkadzającym kierunku (Tabela 1, kolumna 3). W celu jej określenia

niezbędna jest znajomość danych fotometrycznych oprawy oświetleniowej. Podobnie sytuacja przedstawia się w przypadku zdefiniowanych wartości parametru *ULR* (Tabela 1, kolumna 4). Tu także niezbędne jest dysponowanie plikiem fotometrycznym analizowanej oprawy oświetleniowej. Ostatnim analizowanym parametrem jest maksymalna wartość luminancji średniej na elewacji budynku oraz na powierzchni znaku świetlnego (reklamy) (Tabela 1, kolumna 5). Parametr  $L_b$  ma zastosowanie w odniesieniu do obiektów wyposażonych w oświetlenie iluminacyjne.

Warto jednak zaznaczyć, że w myśl zapisu w art. 5.3 *Ustawy o normalizacji* z dnia 19 września 2002 r. (Dz.U. 2002 nr 169 poz. 1386, z późn. zm.), stosowanie Polskich Norm jest dobrowolne. Biorąc jednak pod uwagę zapis (w tej samej ustawie) artykułu 5.4, polskie normy mogą być powoływane w przepisach prawnych po ich opublikowaniu w języku polskim. To nasuwa pytanie, czy mają one status norm obligatoryjnych? Czy powołanie w rozporządzeniu polskiej normy zmienia jej status? Zgodnie ze stanowiskiem PKN powołanie się na polską normę w przepisie prawnym nie zmienia jej dobrowolnego statusu, chyba że ustawodawca świadomie chce zmienić ten status, co jest możliwe przez wyraźne wskazanie tylko w postanowieniach innej ustawy (*lex superior derogat legi inferiori* – akt prawny wyższego rzędu wyłącza akt prawny niższego rzędu) (*Stanowisko PKN 2010*). Podobnie sytuacja przedstawia się w przypadku Raportów Technicznych Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej. Innymi słowy, podane tu wytyczne (Tabela 1) mają jedynie charakter zaleceń, co w praktyce utrudnia egzekwowanie przestrzegania wartości granicznych światła przeszkadzającego.

Dokumentem mającym status aktu prawnego, zawierającym wytyczne dotyczące ograniczenia światła przeszkadzającego, jest *Obwieszczenie 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. W p.6, §293 wspomnianego rozporządzenia (Dz.U. z 2019 r., poz. 1065) 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”. Zapis poświęcony zagadnieniu uciążliwości światła przeszkadzającego jest skromny, na co zwrócono uwagę w literaturze

(Strzyżewski 2021). Jest też problem z egzekwowaniem regulacji prawnych dotyczących zanieczyszczenia światłem (Sielachowska i Zajkowski 2018).

### **Przedmiot, zakres oraz sposób przeprowadzenia badań**

Przedmiotem opisanych badań jest pomiar pionowego natężenia oświetlenia na powierzchni okien budynków mieszkalnych. Pomiar przeprowadzono w odniesieniu do dwóch nieruchomości. Jedną z nich jest blok mieszkalny w Zgierzu (miasto w województwie łódzkim), drugą natomiast Dom Studenta nr 4 Politechniki Krakowskiej w Krakowie (ryc. 1).



Ryc. 1. Zdjęcia panoramiczne budynków mieszkalnych ze wskazanymi oknami, na powierzchni których dokonano pomiarów wertykalnego natężenia oświetlenia: a) blok mieszkalny w Zgierzu przy ul. Parzęczewskiej, b) Dom Studenta nr 4 Politechniki Krakowskiej w Krakowie.

W obu przypadkach (ryc. 1) okna zlokalizowane są na pierwszym piętrze. Należy dodać, że pomieszczenia, w okna których emitowane jest światło z latarni, przewidziane są do spania. Ich wybór wynikał z możliwości dostępu do nich w celu przeprowadzenia badań.

Pomiary przeprowadzono w porze nocnej, na przełomie maja i czerwca 2023 roku. Badania wykonano w dobrych warunkach pogodowych, wykorzystując do tego celu 21 luksomierzy oraz kompaktowy spektrometr z funkcją pomiaru natężenia oświetlenia (ryc. 2, Tabela 2). Na potrzeby niniejszej pracy

poszczególnym miernikom nadano umowne numery od 1 do 22. Zrezygnowano z podawania nazw producentów poszczególnych mierników.



Ryc. 2. Orientacyjny wygląd mierników, którymi dokonano pomiarów wertykalnego natężenia oświetlenia.

Do wykonywania pomiarów przystąpiono po upływie około godziny od momentu załączenia latarni. Uznano, że jest to wystarczający czas, po którym można przyjąć, że strumień świetlny emitowany przez oprawę oświetleniową ustabilizował się. W przypadku luksomierzy, w których głowica fotometryczna zintegrowana jest z jednostką sterującą, w celu zachowania na wyświetlaczu zmierzonej wartości, skorzystano z funkcji Hold.

Natężenie oświetlenia jest parametrem określanym w danym punkcie. Podczas pomiarów starano się, aby głowice fotometryczne luksomierzy były usytuowane na powierzchni okna w tym samym miejscu. Sugerując się informacjami podanymi w projekcie *Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa* z dnia 11 maja 2016 r (Dz.U. z 2019 r., poz. 1065): „pionowe natężenie oświetlenia mierzone jest w centralnym punkcie płaszczyzny okna pomieszczenia stałego pobytu”, głowice fotometryczne luksomierzy na czas pomiaru umieszczano w centralnym miejscu okna, po stronie zewnętrznej. Należy pokreślić, że celem niniejszej pracy nie jest dokonanie oceny spełnienia lub nie wymagań dotyczących światła przeszkadzającego, lecz zwrócenie uwagi na fakt, że rodzaj zastosowanego miernika podczas badań może mieć istotny wpływ na uzyskane rezultaty pomiarów.

Wykorzystane w badaniach przyrządy pomiarowe reprezentują różny poziom pod względem wykonania, parametrów technicznych, a także ceny. Wśród 21 luksomierzy dwa mają rozdzielczość 0,001 lx, sześć rozdzielczość 0,01 lx, sześć rozdzielczość 0,1 lx i siedem rozdzielczość 1 lx, na pierwszym zakresie pomiarowym. W pomiarach wykorzystano dodatkowo kompaktowy spektrometr. Jest to przyrząd pomiarowy, który poza bezwzględną charakterystyką spektralną promieniowania umożliwia dodatkowo pomiar m.in. natężenia oświetlenia z rozdzielczością 0,01 lx. Pod pojęciem rozdzielczości należy rozumieć najmniejszą wartość, jaka może być zmierzona przez miernik.

Uwzględnienie luksomierzy o rozdzielczości 1 lx (przy pomiarach niskich poziomów natężenia oświetlenia) może budzić pewne zdziwienie. Warto jednak zaznaczyć, że niektórzy „pomiarowcy”, którzy na co dzień nie zajmują się profesjonalnymi pomiarami natężenia oświetlenia uważają, że jeśli w specyfikacji luksomierza podano dolną wartość zakresu pomiarowego równą 0 lx i luksomierz jest wywzorcowany, to wskazywane przez fotometr wartości można uznać za wiarygodne (Tabaka i Wtorkiewicz 2020).

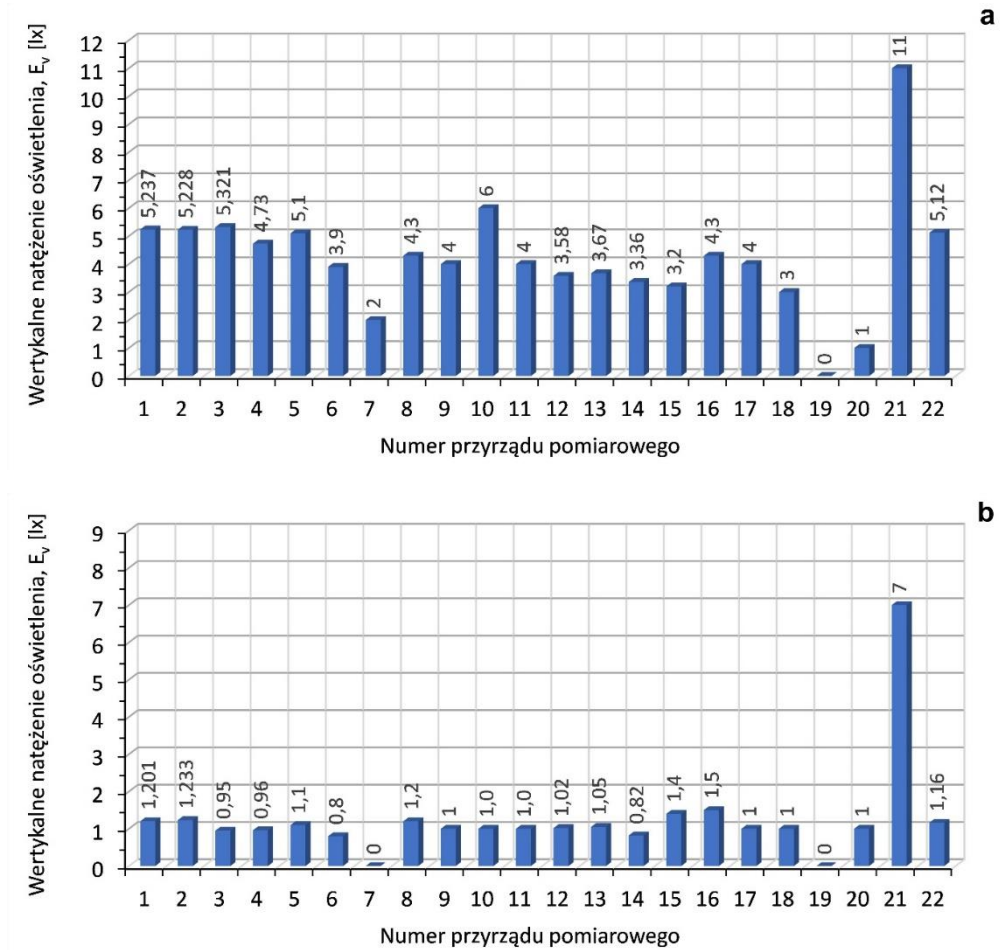
Dodatkowo pomiary uzupełniono rejestracją charakterystyki spektralnej promieniowania, emitowanego przez latarnię w kierunku analizowanego okna.

Tabela 2. Podstawowe dane techniczne mierników użytych podczas pomiarów.

Lp.	Zakresy pomiarowe	Rozdzielczości na poszczególnych zakresach	Klasa	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Błąd całkowity
1.	50; 5000; 500000	0,001; 0,1; 10	A	≤ 2%	≤ 2%	≤ 2,5%
2.	30; 300; 300000	0,001; 0,01; 10	A	≤ 2%	≤ 1,5%	≤ 2,5%
3.	20; 200; 2000; 20000; 200000	0,01; 0,1; 1; 10; 100	B	≤ 3%	≤ 3%	10%
4.	40; 400; 4000; 40000	0,01; 0,1; 1; 10			3,0%	±3% rdg ±5 dtgs
5.	200; 2000; 20000	0,1; 1; 10	A	≤ 2%	≤ 1,5%	
6.	200; 2000; 20000; 200000	0,1; 1; 10; 100				±3% rdg +5 dtgs dla zakresu 200 lx; ±3% rdg +10 dtgs dla zakresu 2000 lx; ±4% rdg +5 dtgs dla zakresów 20000 lx i 200000 lx
7.	20000; 100000	1; 10	B			
8.	1999; 19990; 50000	1; 10; 100				
9.	200; 2000; 20000; 50000	0,1; 1; 10; 100				±5%+ 10 cyfr dla < 10000 lx; ±10%+ > 10000 lx
10.	200; 2000; 20000; 200000	0,1; 1; 10; 100				±3% rdg ±10 dtg dla ≤ 20000 lx; i ±5% rdg ±10% dtg dla > 20000 lx
11.	40; 400; 4000; 40000	0,01; 0,1; 1; 10	A			≤3%
12.	40; 400; 4000; 40000; 400000	0,01; 0,1; 1; 100; 1000	A	±3%	30°: ±2% 60°: ±6% 80°: ±25%	
13.	40; 400; 4000; 40000	0,01; 0,1; 1; 100		≤ 6%	≤ 2%	±5% ±10d dla < 10000 lx; ±10% ±10d dla > 10000 lx
14.	200; 2000; 20000	0,1; 1; 10	A			±4% rdg ±0.5% f.s. dla zakresów 200 lx i 2000; ±7% rdg ±1% f.s. dla zakresu 20000 lx
15.	200; 2000; 20000; 200000	0,1; 1; 10; 100		≤ 6%	≤ 2%	± 3% + ±0.5% f.s. ±4% + ±10D vid > 10.000 lx
16.	2000; 20000; 100000	1; 10; 100				1-10.000 lx: ±4 %; 10.000-100.000 lx: ±5%
17.	2000; 20000; 50000	1; 10; 100				5%
18.	10000; 200000	1; 10				±4%rdg+5dtgs dla < 10000; ±5%rdg+10dgt dla ≥ 10000
19.	4000; 40000	1; 10				±5% +/-10d
20.	40; 400; 4000; 40000; 400000	0,01; 0,1; 1; 100; 1000		≤ 6%	≤ 2%	±3% rdg ±0.5% f.s. ±4% rdg ±10 dgs dla > 10000 lx range
21.	1999; 19990; 50000	1; 10; 100				
22.	100000	0,01	B			

## Wizualizacja rezultatów pomiarów

Zmierzone wartości natężenia oświetlenia dwudziestoma dwoma przyrządami pomiarowymi dla dwóch lokalizacji zilustrowano graficznie (ryc. 3). Wartości liczbowe etykiet kolumn podane są z różną liczbą miejsc po przecinku, co wynika z rozdzielczości danego miernika.

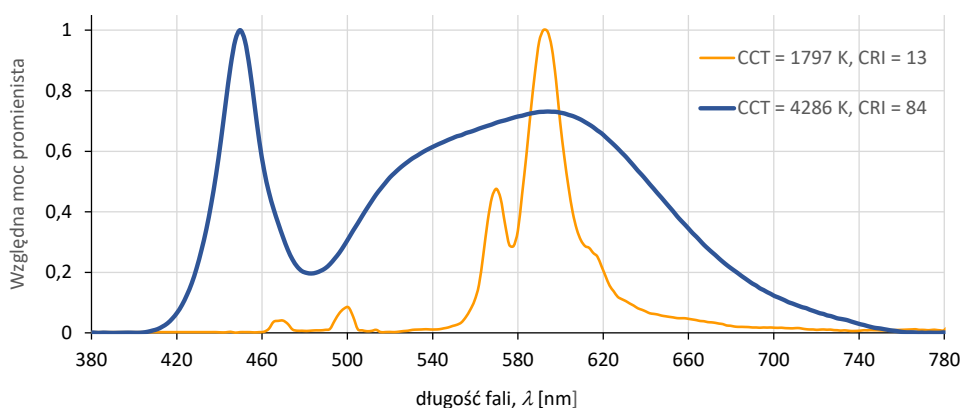


Ryc. 3. Zmierzone wartości pionowego natężenia oświetlenia różnymi miernikami na powierzchni okna: a) budynku mieszkalnego w Zgierzu, b) Domu Studenckiego PK.

Wyznaczono również względne charakterystyki spektralne promieniowania emitowanego przez oświetlenie zewnętrzne (latarnie) w kierunku okien, na powierzchni których przeprowadzono pomiary wertykalnego natężenia oświetlenia (ryc. 4). Na podstawie charakterystyk spektralnych obliczono wartości temperatury barwowej najbliższej CCT (ang. *Correlated Color Temperature*) oraz ogólnego wskaźnika oddawania barw CRI (ang. *Color Rendering*



*Index*). W przypadku budynku mieszkalnego w Zgierzu, zarejestrowany rozkład widmowy światła jednoznacznie wskazuje, że lampą zainstalowaną w oprawie oświetleniowej jest wysokoprężna lampa sodowa. Dynamiczny rozwój technologii produkcji źródeł LED, wymuszony potrzebą minimalizacji zużycia energii elektrycznej na cele oświetleniowe, skutkuje wdrażaniem nowych źródeł światła do obszaru oświetlenia publicznego. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest wymiana opraw oświetleniowych (Ścieżor 2022). Sytuacja tak miała miejsce w przypadku osiedla akademickiego Politechniki Krakowskiej, na której zlokalizowany jest drugi budynek – Dom Studenta nr 4. Klasyczne oprawy oświetleniowe współpracujące z wysokoprężnymi lampami sodowymi zastąpiono oprawami w technologii LED.



Rys. 4. Względne charakterystyki spektralne promieniowania emitowanego w kierunku okien przez oświetlenie zewnętrzne.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych pomiarów ponad dwudziestoma przyrządami pomiarowymi, można dostrzec rozbieżności w zarejestrowanych wartościach natężenia oświetlenia. Największe różnice we wskazaniach odnotowano w przypadku pomiarów przeprowadzonych w Zgierzu (ryc. 3a). Jeśli wziąć pod uwagę dwa skrajne przypadki, to różnice są znaczne. Luksomierz o numerze 19 wskazał 0 lx, natomiast luksomierz opatrzony numerem 21 wyświetlił wartość 11 lx. Można jednak dostrzec grupę fotometrów, których wskazania są zbliżone. Są to mierniki o numerach 1, 2, 3, 4, 5 i 22.

W przypadku pomiarów wykonanych w drugiej lokalizacji, w odniesieniu do większości mierników wskazania oscylują około 1 lx (ryc. 3b). Wśród luksomierzy, które nie radzą sobie z zarejestrowaniem niskiej wartości natężenia oświetlenia są fotometry o numerach 7 oraz 19. Podobnie jak w poprzednim przypadku, luksomierz 21 wyświetla zawyżoną wartość.

## Wnioski

Zaprezentowane wyniki badań odnoszą się zaledwie do dwóch lokalizacji, co uprawnia do stwierdzenia, że mają charakter pilotażowy. Na podstawie uzyskanych pomiarów można jednak stwierdzić, że niektóre fotometry nie są predysponowane do oceny immisji światła. Niewątpliwie do tej grupy fotometrów można zaliczyć mierniki o numerach 7, 19 i 21. Niektóre z luksomierzy mają tendencję do zawyżania wartości, inne zaś do zaniżania, co może prowadzić do błędnych wniosków przy ocenie światła przeszkadzającego. Może jednak zdarzyć się tak, że ten sam fotometr, w zależności od miejsca wykonywania pomiarów, może w sposób istotny zaniżyć zarejestrowaną wartość lub wskazać wartość bliższą rzeczywistości. Powodem tego stanu rzeczy będą m.in. charakterystyka spektralna promieniowania docierającego do głowicy fotometrycznej luksomierza oraz kąt pod jakim promieniowanie pada na światłoczuły element luksomierza. Innymi słowy, ten sam fotometr nie w każdym przypadku będzie wskazywał zaniżoną lub zawyżoną wartość. Aby uniknąć tego typu sytuacji wskazane jest korzystanie z luksomierzy, w stosunku do których korekcja widmowa oraz przestrzenna nie budzi zastrzeżeń. Niestety ceny takich mierników są dużo wyższe od najprostszych dostępnych rozwiązań.

Problemem, który może nastęrczać trudności przy ocenie spełnienia (lub nie) wymagań dotyczących dopuszczalnych wartości światła przeszkadzającego, jest brak uwzględnienia tolerancji w wytycznych (Tabela 1). Podanie np. 5 lx jako wartości granicznej wertykalnego natężenia oświetlenia, rodzi pytanie, czy nieznaczne przekroczenie jej jest równoznaczne z niespełnieniem wymagań? Np. sugerując się wskazaniem luksomierza 4 (4,73 lx, ryc. 3a) przy ocenie immisji światła, można jednoznacznie stwierdzić, że wartość graniczna nie została przekroczona. Co, w takim razie, można sądzić w przypadku wskazań mierników o numerach: 1, 2, 3, 5 czy 22?

## Literatura

- CIE 150:2003, 2017. *Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light*, International Commission on Illumination. DOI:10.25039/TR.150.2017.
- Gaston K.J., Gaston S. Bennie J. Hopkins J., 2015. Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment. *Environ. Rev.* 23: 14–23.
- Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 8 kwietnia 2019 roku* (Dz.U. z 2019 r., poz. 1065).
- PN-EN 12464-2:2014-05 *Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz*.

- Sielachowska M., Zajkowski M., 2018. Szacowanie zanieczyszczenia światłem od obiektów sportowych za pomocą oprogramowania symulacyjnego DIALUX, *Electrical Engineering, Poznań University of Technology Academic Journals*: 219–229.
- Skarżyński K., 2017. Penetracja światłem obiektu iluminowanego w kontekście polskich wymagań normatywnych. *Polish Journal for Sustainable Development* 21(2): 107–116. DOI:10.15584/pjdsd.2017.21.2.12.
- Skwarło-Sońta K., 2015. Skażenie światłem: co dziś wiemy o jego wpływie na funkcjonowanie organizmu człowieka? *Kosmos* 64(4): 633–642.
- Stanowisko PKN w kwestii dobrowolności stosowania Norm, 2018 <https://profen.com.pl/wp-content/uploads/2017/06/Stanowisko-PKN-w-kwestii-dobrowolnoci-stosowania-Norm.pdf> (dostęp: 25.06.2023).
- Ścieżor T., 2022. Lighting of pedestrian and pedestrian-driving routes in a housing estate as a source of light pollution, *Technical Transactions*. DOI:10.37705/TechTrans/e2022012.
- 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\\_1.pdf](http://slaska.iarp.pl/wp-content/uploads/2016/05/dokument221821_1.pdf) (dostęp: 15.02.2023).
- Strzyżewski J., 2021. Uciążliwość światła przeszkadzającego. *Budownictwo i Prawo* 25(3): 18–23.
- Tabaka P., Wtorkiewicz J., 2020. Ocena przydatności świadectwa wzorcowania luksomierza w odniesieniu do wybranych problemów przy pomiarach fotometrycznych. [w:] Roj J. (red.), *Metrologia naukowa, normatywna i przemysłowa – wybrane zagadnienia*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice: 93–76.
- Tabaka P., Wtorkiewicz J., 2021. Wpływ użytego luksomierza na wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w kontekście zanieczyszczenia światłem. [w:] Tabaka P. (red.), *Sztuczne światło nocą. Między zagrożeniem a rozwojem*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź: 63–114.
- Tabaka P., Wtorkiewicz J., 2022. Analysis of the Spectral Sensitivity of Luxmeters and Light Sensors of Smartphones in Terms of Their Influence on the Results of Illuminance Measurements – Example Cases. *Energies* 15(16). DOI:10.3390/en15165847.

## **Streszczenie**

W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów wertykalnego natężenia oświetlenia z wykorzystaniem 21 różnych luksomierzy oraz spektrometri z funkcją pomiaru natężenia oświetlenia. Wybrane do badań mierniki charakteryzują się różną jakością oraz ceną i są pewną próbką fotometrów dostępnych na rynku. Pomiary przeprowadzono w terenie, na przełomie maja i czerwca 2023 roku, po zapadnięciu zmroku. Głowicę fotometryczną luksomierza umieszczono na pionowej powierzchni okna budynków mieszkalnych w Zgierzu i Krakowie. Pomiary uzupełniono rejestracją charakterystyki spektralnej promieniowania emitowanego w kierunku analizowanego okna. Analizując uzyskane wyniki przeprowadzonych pomiarów można dostrzec rozbieżności w zarejestrowanych przez poszczególne fotometry wartościach wertykalnego natężenia oświetlenia. Różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wartością zmierzonego natężenia oświetlenia na powierzchni tego samego okna jest znaczna. Oznacza to, że rodzaj użytego luksomierza ma istotny wpływ na uzyskaną wartość wertykalnego natężenia oświetlenia. W praktyce może to być źródłem błędnych wniosków zamieszczanych w opracowaniach dotyczących oceny światła przeszkadzającego.

**Słowa kluczowe:** oświetlenie zewnętrzne, światło przeszkadzające, luksomierz, wertykalne natężenie oświetlenia.

## **The impact of the used luxmeter on the results of measurements of vertical illuminance on residential real estate**

### **Summary**

The paper presents the results of vertical illuminance measurements using twenty-one different luxmeters and a spectroradiometer with the function of measuring illuminance. The meters selected for the tests are characterized by various quality and prices. They are a certain sample of photometers available on the market. The field studies were carried out after dark, at the turn of May and June 2023. The photometric head of the luxmeter was placed on the vertical window surface of residential buildings located in Zgierz and Kraków. The measurements were supplemented with the registration of the spectral characteristics of the radiation emitted in the direction of the analysed window. Analysis of the results obtained from the measurements reveals discrepancies in the vertical illuminance values recorded by individual photometers. The difference between the maximum and minimum value of the measured illuminance on the surface of the same window is significant. This means that the type of luxmeter used has a significant impact on the obtained value of vertical illuminance. In practice, this may be a source of erroneous conclusions in studies on the assessment of obstructive light.

**Key words:** outdoor lighting, obstructive light, illuminance meter, vertical illuminance.

### **Dane kontaktowe autorów:**

#### **Przemysław Tabaka**

Politechnika Łódzka

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

e-mail: przemyslaw.tabaka@p.lodz.pl

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

#### **Tomasz Ścieżor**

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

e-mail: tsciezor@pk.edu.pl

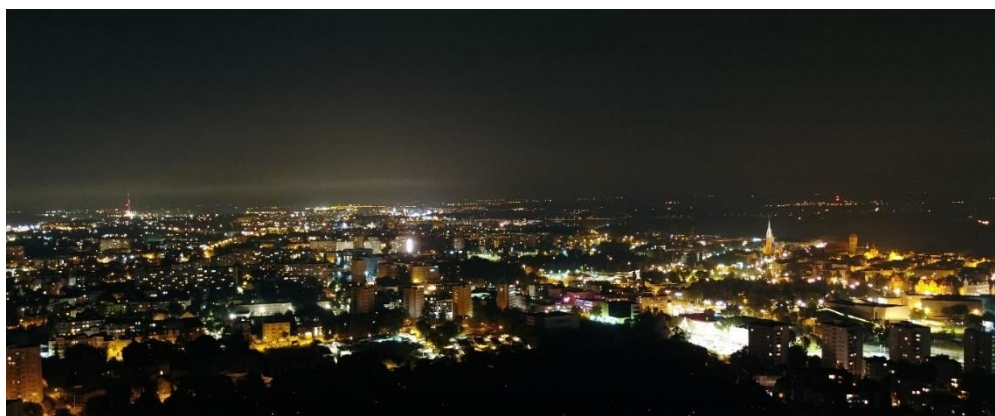
**Mieczysław Kunz, Dominika Karpińska**

## **Problematyka wizualizacji kartograficznej wyników pomiarów zanieczyszczenia światłem nocnego nieba**

### **Wprowadzenie**

Naturalne środowisko naszego życia systematycznie ulega degradacji pod wpływem różnego rodzaju zanieczyszczeń, zwłaszcza antropogenicznych. Jest to spowodowane głównie rozwojem cywilizacyjnym i postępującą globalizacją. Działalność człowieka w ostatnich kilku dekadach przyczyniła się do istotnych zmian w środowisku, które obecnie podlegają monitoringowi oraz analizie. Większość z efektów działalności człowieka wykazuje rosnący negatywny wpływ na stan i jakość funkcjonowania organizmów żywych. Jedną z form postępującej degradacji środowiska jest zanieczyszczenie światłem nocnego nieba, które jest zjawiskiem coraz powszechniej zauważalnym. Głównym jego źródłem jest nieprzemysłana bądź źle zaprojektowana iluminacja zewnętrzna, nadmierna emisja sztucznego światła w dolną część atmosfery oraz rozpraszanie i odbijanie światła przez zalegające w troposferze chmury warstwowe i pyły pochodzenia antropogenicznego (Kołomański 2015; Ścieżor 2020; Ścieżor i Czaplicka 2020). Ten negatywny proces można zaobserwować nad obszarami zurbanizowanymi (ryc. 1), ale oddziałuje on zarówno na środowisko miejskie, jak i na tereny do niego przylegające. Szacuje się, że około 80% światowej populacji i ponad 99% mieszkańców Stanów Zjednoczonych Ameryki oraz Europy mieszka na obszarach charakteryzujących się nocnym niebem, które jest zanieczyszczone sztucznym światłem (Cinzano i in. 2001; Falchi i in. 2016). Badanie nadmiernej emisji światła wyemitowanego w atmosferę jest dzisiaj problemem interdyscyplinarnym, wymagającym ukierunkowanych analiz specjalistów reprezentujących różne dziedziny naukowe, takie jak astronomia, biologia, medycyna, geografia czy

fizyka. Prowadzone obserwacje wykazały, iż zwiększona ilość światła na nocnym niebie pociąga za sobą szereg negatywnych konsekwencji. Jedną z nich jest zużywanie dodatkowej ilości energii powodujące nieuzasadnione koszty ekonomiczne i zużycie surowców kopalnych. Smog świetlny wpływa także na rozwój i życie roślin, zwierząt oraz przede wszystkim na zdrowie i samopoczucie ludzi (Jones i Francis 2003; Stevens 2009; Connors i in. 2010; Falchi i in. 2011; Garcia-Saenz i in. 2018). Ogromnym problemem jest także oświetlanie obszarów, które powinny pozostać zaciemnione (Kołomański 2015). Takim przykładem są obserwatoria astronomiczne, które w założeniu powinny być oddalone od wpływu miejskiej łuny świetlnej (Falchi i in. 2023). Istniejące już placówki zlokalizowane na obrzeżach miast, z roku na rok coraz bardziej narażone są na zwiększający się przestrzennie w każdym kierunku zasięg wyspy świetlnej. W celu ochrony nocnego nieba przed tym negatywnym zjawiskiem zakładane są w wybranych miejscach świata tzw. parki nocnego nieba. Amerykańska organizacja IDA (ang. *International Dark-Sky Association*) podjęła się działań służących zachowaniu i ochronie nocnego środowiska naturalnego, a także wydawaniu certyfikatów tzw. miejsc ciemnego nieba (ang. *International Dark Sky Places*) dla obszarów spełniających bardzo rygorystyczne warunki w tym zakresie (Karpińska i Kunz 2020; IDA 2022).



Ryc. 1. Nocna panorama Torunia wykonana z pokładu bezzałogowego statku powietrznego obrazująca opisywane zjawisko smogu świetlnego w obszarach zurbanizowanych (fot. Mieczysław Kunz).

O randze i znaczeniu opisywanej problematyki dodatkowo świadczy fakt, iż w listopadzie 2017 roku organizacja UNESCO podjęła rezolucję o ustanowieniu 16 maja Międzynarodowym Dniem Światła. Głównym jego celem jest zwrócenie uwagi, iż technologie oparte na świetle i światło pochodne istotnie wpływają na codzienne życie wszystkich organizmów żywych. Technologie te odgrywają również ważną rolę w osiągnięciu efektywności energetycznej, głównie poprzez

ograniczanie jej strat i zmniejszanie zanieczyszczenia światłem. Działania te są kluczowe dla zachowania ciemnego nieba służącego realizacji podstawowego prawa każdego człowieka do obcowania z tym darem natury.

Obserwowane zjawisko zanieczyszczenia światłem nocnego nieba stało się na tyle istotnym elementem globalnym, iż rozpoczęto poszukiwanie efektywnych i czytelnych metod prezentacji kartograficznej jego natężenia i występowania. Pomimo jednak rosnącego zainteresowania tematem nie zostały jeszcze opracowane formalne normy prawne i użytkowe oraz regulacje czy wytyczne służące uniwersalnemu opisowi zjawiska i prezentacji zasięgu jego występowania. Jak dotąd dopiero kilka europejskich państw może pochwalić się pierwszymi zapisami prawnymi, opisującymi wielkość nadmiernej emisji światła oraz rekomendujących utrzymanie optymalnych z punktu widzenia zdrowia, głównie człowieka, nocnych warunków oświetleniowych (*Light pollution reduction measures in Europe 2022*)

W Polsce w 2022 roku grupa ekspertów z wybranych krajowych ośrodków naukowych opracowała dokument w formie memorandum, który według założeń ma być początkiem ukierunkowanej dyskusji oraz przyczynkiem do rozpoczęcia prac nad przygotowaniem krajowych regulacji prawnych w tym zakresie (Szlachetko 2022). Nie zmienia to jednak faktu, iż do tej pory nie określono w żadnym powszechnie dostępnym dokumencie granicznej wartości jasności powierzchniowej nieba, jak i oświetlenia gruntu, które miałyby już negatywnie wpływać na człowieka oraz na inne biotyczne elementy środowiska przyrodniczego. W tym zakresie brakuje także wytycznych oraz instrukcji technicznych dotyczących spójnego i ukierunkowanego na odbiorcę masowego sposobu przedstawiania rozkładu przestrzennego zjawiska, w tym przekonujących i łatwych w odbiorze prezentowanych treści metod wizualizacji kartograficznej.

W przeanalizowanej literaturze przedmiotu, zarówno specjalistycznej jak i popularno-naukowej, dostępne są przykłady zobrazowań satelitarnych czy wykonanych analiz przestrzennych dotyczących prezentacji wyników pomiarów zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba, które opracowane są jednak z wykorzystaniem różnych skal barwnych, w uznaniowych przedziałach i jednostkach pomiarowych (Kolláth 2010; Falchi i in. 2016; Hänel i in. 2017; Karpińska i Kunz 2019; Levin i in. 2020; Mander i in. 2023). Jednolita i spójna koncepcyjnie prezentacja kartograficzna rozkładu przestrzennego zjawiska zanieczyszczenia światłem nocnego nieba jest istotnym elementem jego właściwej interpretacji i analizy. Przedstawiony obraz powinien być zrozumiały dla wszystkich odbiorców, zarówno naukowców jak i użytkowników niewyspecjalizowanych. Stanowi on także element edukacyjny i promocyjny



np. dla osób zainteresowanych rozwojem astroturystyki czy polepszeniem lokalnych zewnętrznych warunków środowiskowych najbliższego otoczenia. Wyniki badań nad jakością nocnego nieba powinny być także przedstawione wspólnie z innymi czynnikami degradującymi środowisko, które są wpisane w zakres tematyczny urzędowych map sozologicznych czy innych wydawanych map geośrodowiskowych lub turystyczno-krajobrazowych.

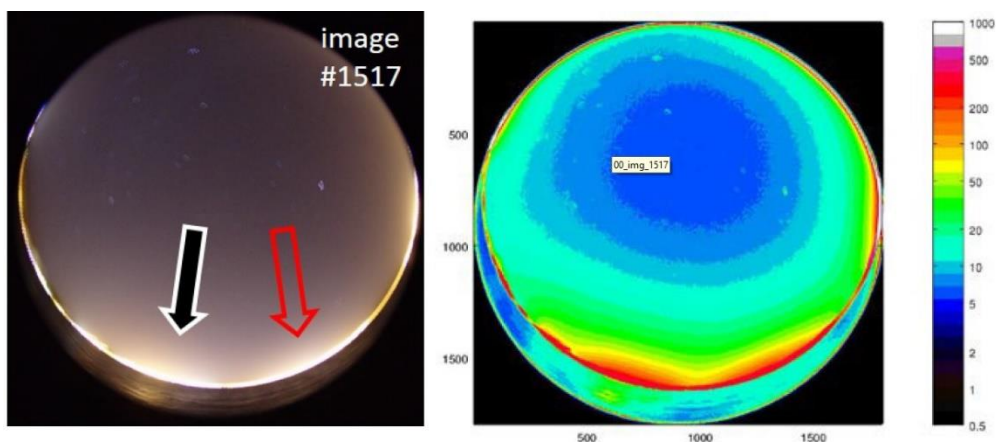
W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd spotykanych w specjalistycznej literaturze przedmiotu różnych metod prezentacji kartograficznych oraz stosowanych skal i jednostek pomiarowych, opisujących intensywność zjawiska zanieczyszczenia światłem nocnego nieba. Opisano także różnice pomiędzy wykorzystywanymi przez badaczy reprezentujących różne dyscypliny naukowe skalami pomiarowymi oraz ich późniejszym wpływem na interpretację wyników. Z punktu widzenia praktycznego zwrócono także uwagę na potrzebę przedstawienia uzyskanych wyników w formalnej i jednoznacznej szacie graficznej, zgodnej z obowiązującymi zasadami wizualizacji kartograficznej zjawisk dotyczących stanu i jakości środowiska przyrodniczego oraz umożliwiającej porównywanie wartości z różnych obszarów. W końcowej części rozdziału przedstawiono propozycję wytycznych służących ujednoczeniu stosowanych dotychczas rozbieżnych metod prezentacji kartograficznej wyników pomiarów smogu świetlnego.

### **Metody pomiaru wielkości zanieczyszczenia światłem nocnego nieba**

Zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba może być mierzone na kilka różnych sposobów. Istnieją metody pomiarowe dostępne wyłącznie dla specjalistów, oraz takie, które stosować mogą amatorzy, hobbistycznie zajmujący się obserwacją nocnego nieba (Kołomański 2015; Hänel 2017; Levin i in. 2020; Ścieżor 2021; Mander i in. 2023). Wykorzystywane metody możemy podzielić ze względu na wybrane kryteria. Spotykamy metody instrumentalne i metody obserwacyjne. Ze względu na kierunek realizowanych pomiarów metody te możemy rozdzielić na takie, które realizują pomiar z powierzchni terenu w górę, głównie w kierunku zenitalnym oraz na odwrotne, tzn. na takie, gdy pomiar wykonywany jest z określonej wysokości w kierunku powierzchni ziemi. W tym drugim przypadku – pomiarze wielkości emisji sztucznego światła, konieczne jest stosowanie takich instrumentów, które posiadają czułość widmową pokrywającą się w całości z zakresem światła widzialnego (400–700 nm). Ograniczenie w procesie rejestracyjnym części pasma promieniowania elektromagnetycznego skutkują błędami pomiarowymi i przez to mocno ogranicza możliwość porównywania wyników.

Najczęściej wykorzystywaną w praktyce metodą instrumentalną mierzącą powierzchniową jasność nocnego nieba jest realizacja pomiarów fotometrami SQM (ang. *Sky Quality Meters*) i TESS (ang. *Telescope Encoder and Sky Sensor*) (Kolláth 2010; Hänel 2017; Karpińska i Kunz 2019, 2020, 2022; Ścieżor 2020, 2021; Mander i in. 2023). Urządzenia te występują na rynku zarówno w prostych wersjach manualnych, jak i bardziej zaawansowanych półautomatycznych czy automatycznych. W pierwszym przypadku użytkownik samodzielnie uruchamia przycisk wykonywania pomiarów i odczytuje wartość pokazaną na wyświetlaczu. W drugim przypadku pomiary realizowane są samoczynnie w określonym, ustalonym programowo czasie i interwale. Metoda automatyczna pozwala na realizację pomiarów w dowolnym czasie i miejscu bez obecności człowieka, niezależnie od panujących warunków pogodowych. Jest ona przeznaczona do prowadzenia systematycznych badań i monitoringu w dłuższych okresach czasu i pozwala na określenie m.in. zmienności czasowej czy trendów analizowanego zjawiska. Ograniczeniem jej jest jednak zasięg przestrzenny pojedynczego pomiaru, co wiąże się dla większych obszarów z potrzebą założenia przemyślanej i dobrze zaprojektowanej sieci pomiarowej.

Inną, także często wykorzystywaną metodą instrumentalną, jest obrazowanie nocnego nieba za pomocą cyfrowych aparatów fotograficznych lub kamer (Jechow i in. 2017, 2017a, 2019). W tym przypadku zastosowanie mają też aparaty wyposażone w obiektywy typu „rybie oko” (ang. *all-sky*), dzięki którym możliwe jest zarejestrowanie jednocześnie całego nieboskłonu (ryc. 2).



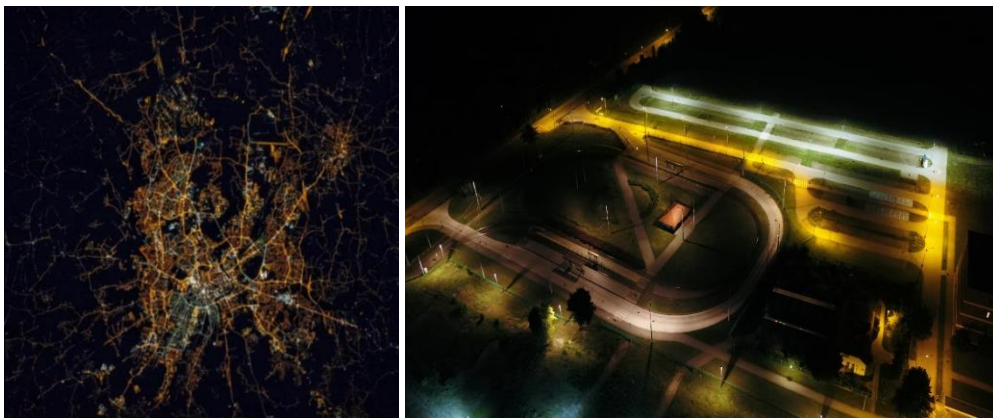
Ryc. 2. Zdjęcie nocnego nieba wykonane obiektywem typu „rybie oko” (lewo), zdjęcie przetworzone do postaci metrycznej z wykorzystaniem spektralnej skali barwnej (prawo) (źródło: Jechow i in. 2019).

Niezależnie jednak od typu obiektywu, wykonane zdjęcia zapisywane są w formacie bezstratnym (np. \*.raw), co pozwala nie tylko na ich jakościową

ocenę, ale przede wszystkim na dalsze przetwarzanie pozyskanych materiałów w specjalistycznym oprogramowaniu, służącym prezentacji zarejestrowanych danych w metryczny sposób (ryc. 2).

W przypadku rejestracji odwrotnej, tj. z góry w kierunku ziemi, wykonywane są wówczas pomiary energii świetlnej promieniowania emitowanego z obszaru objętego akwizycją danych obrazowych. W tym celu wykorzystuje się obrazy rastrowe pozyskane za pomocą technik teledetekcyjnych, zarówno satelitarnych, jak i lotniczych oraz coraz bardziej popularnych bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Wykonane w ten sposób zobrazowania służą nie tylko analizie jakościowej, ale przede wszystkim ilościowej uzyskiwanej w procesie przetwarzania danych. Dane satelitarne o emisji sztucznego światła z ziemi dostarczane są przez satelity obserwacyjne serii DMSP, Suomi-NPP oraz LuoJia 1-01 (Cinzano i in. 2000; Elvidge i in. 2013; Zhang i in. 2020). Zobrazowania te różnią się rozdzielczością czasową, czyli okresem rewizyty oraz rozdzielczością przestrzenną, wynoszącą odpowiednio 3 km, 1 km oraz 130 metrów. Chociaż pierwszy wymieniony satelita cechuje się małą rozdzielczością terenową, to jego niewątpliwą zaletą jest duży zakres obszarowy rejestracji. Na jednym ujęciu uwidocznione może być całe miasto lub nawet kraj, a mozaika policzalnych zdjęć obejmie zasięgiem całą kulę ziemską, oczywiście przy dużym uogólnieniu treści. W przypadku satelity LuoJia 1-01 zarejestrowany obraz pozwala już na szczegółowe analizy lokalnych źródeł światła. Niedogodnością w analizach czasowych zdjęć satelitarnych jest brak możliwości wykonania rejestracji przy częściowym lub całkowitym zachmurzeniu. Specyfikacja techniczna instrumentów umieszczonych na pokładach satelitów wskazuje, iż rejestracja wykonywana jest w niepełnym przedziale światła widzialnego, co w konsekwencji powoduje powstawanie błędów interpretacyjnych. Ciekawymi zobrazowaniami są także zdjęcia wykonywane przez astronautów przebywających na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej ISS (ryc. 3). W ogólnodostępnej bazie NASA można znaleźć zdjęcia nocne wybranych miast świata. Jest to dobry materiał do analizy emisji sztucznego światła z danego fragmentu powierzchni ziemi. Takie zdjęcia przedstawiają źródła światła oraz ich kolor, ale zazwyczaj wykonywane są jednorazowo i tylko dla dużych skupisk ludzkich, a na podstawie pojedynczych rejestracji nie można analizować zmienności czasowej zjawiska. Dopełnieniem rejestracji satelitarnych są pomiary wykonywane z pułapu lotniczego. Zdjęcia lotnicze cechują się dużo większą rozdzielczością przestrzenną, jednak dla pokrycia większego obszaru (np. miasta) należy wykonać powtarzalną w czasie akwizycję powierzchniową złożoną z wielu zdjęć, co wiąże się z dużymi kosztami takich prac. Współcześnie rozwijaną alternatywą dla bardzo małych obszarów (np. ulice, kwartały, osiedla

mieszkańcowie) są pomiary wykonywane za pomocą bezzałogowych statków powietrznych. Ich niewątpliwą zaletą są niskie koszty pozyskania danych, duża powtarzalność rejestracji oraz bardzo wysoka rozdzielczość terenowa, która pozwala na identyfikacje nawet pojedynczego źródła światła (ryc. 3).



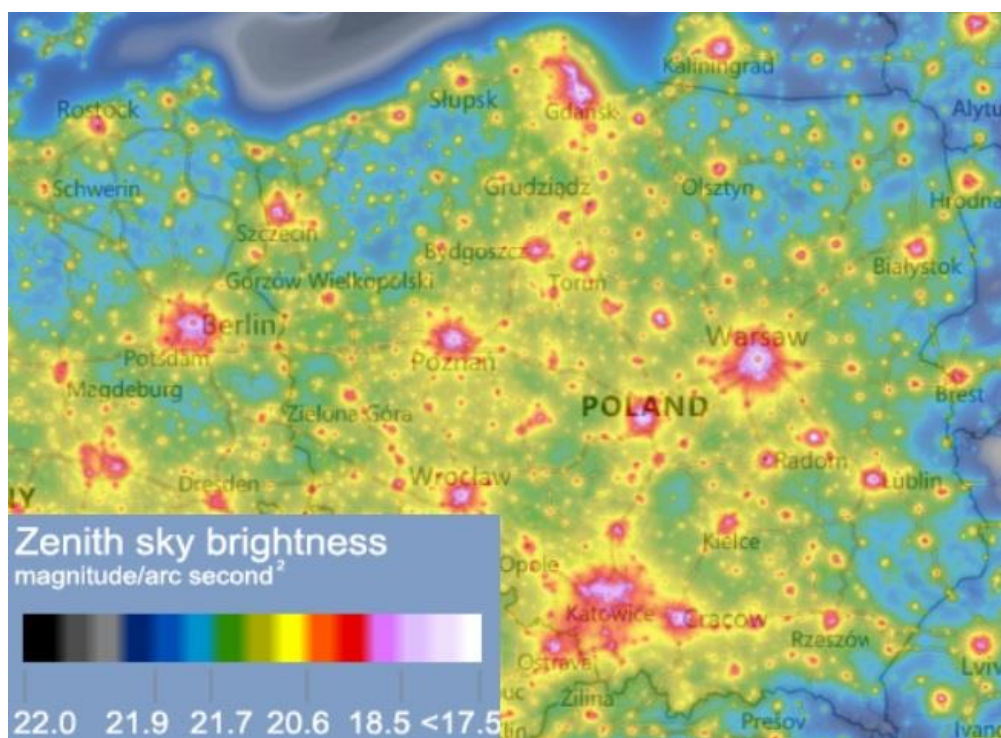
Ryc. 3. Pionowe zdjęcie satelitarne Krakowa wykonane z pokładu ISS (lewo) oraz nachylone zdjęcie fragmentu Torunia wykonane z pokładu bezzałogowego statku powietrznego (prawo) (fot. Mieczysław Kunz).

Innymi sposobami wykonywania pomiarów zanieczyszczenia światłem nocnego nieba jest wykorzystanie dostępnych metod obserwacyjnych (Ścieżor 2021). Wśród nich, najczęściej wykorzystywaną, zarówno przez amatorów jak i specjalistów, jest szacunkowa ocena jakości nocnego nieba. Polega ona na określeniu stopnia zanieczyszczenia nieba przez przyporządkowanie stanu obecnego obiektów widocznych na nocnym niebie do jednej z wyodrębnionych klas podanych we wzorcu interpretacyjnym (zobacz treść ryciny 10).

### **Skale i jednostki pomiarowe używane do przedstawienia oceny jasności nocnego nieba**

Pomiary zanieczyszczenia światłem nocnego nieba mogą być wykonywane z wykorzystaniem opisanych powyżej metod i sposobów akwizycji danych. Zarejestrowane w różny sposób dane dotyczące tego samego zjawiska są jednak przedstawiane czy wizualizowane przy wykorzystaniu różnych skal i jednostek pomiarowych. Najbardziej rozpowszechnioną jednostką pomiarową opisującą zanieczyszczenie światłem jest  $\text{mag/arcsec}^2$  (*magnitudo na sekundę kątową do kwadratu*), wykorzystana do przedstawienia danych uzyskanych przede wszystkim z pomiarów fotometrem SQM. Ta pozaukładowa jednostka jest powszechnie stosowana w astronomii i wyraża wartość jednocześnie w skali logarytmicznej i odwrotnej. Oznacza to, że wielkość  $22 \text{ mag/arcsec}^2$  przedstawia niebo doskonale ciemne, bez negatywnego wpływu jakiegokolwiek naziemnego

źródła światła. Dla porównania nocne niebo w obszarach mocno zurbanizowanych wykazuje wartości w przedziale od około 14 do 16 mag/arcsec<sup>2</sup> (Kołomański 2015; Hänel 2017; Ścieżor 2020; Karpińska i Kunz 2020). Skala ta używana jest powszechnie w atlasach zanieczyszczenia światłem (Cinzano i in. 2001; Falchi i in. 2016) (ryc. 4 i 5). W niektórych przypadkach jest ona dodatkowo przeliczana na jednostkę układu SI przedstawiającą luminescencję (cd/m<sup>2</sup>), która jest miarą natężenia oświetlenia padającego w danym kierunku.

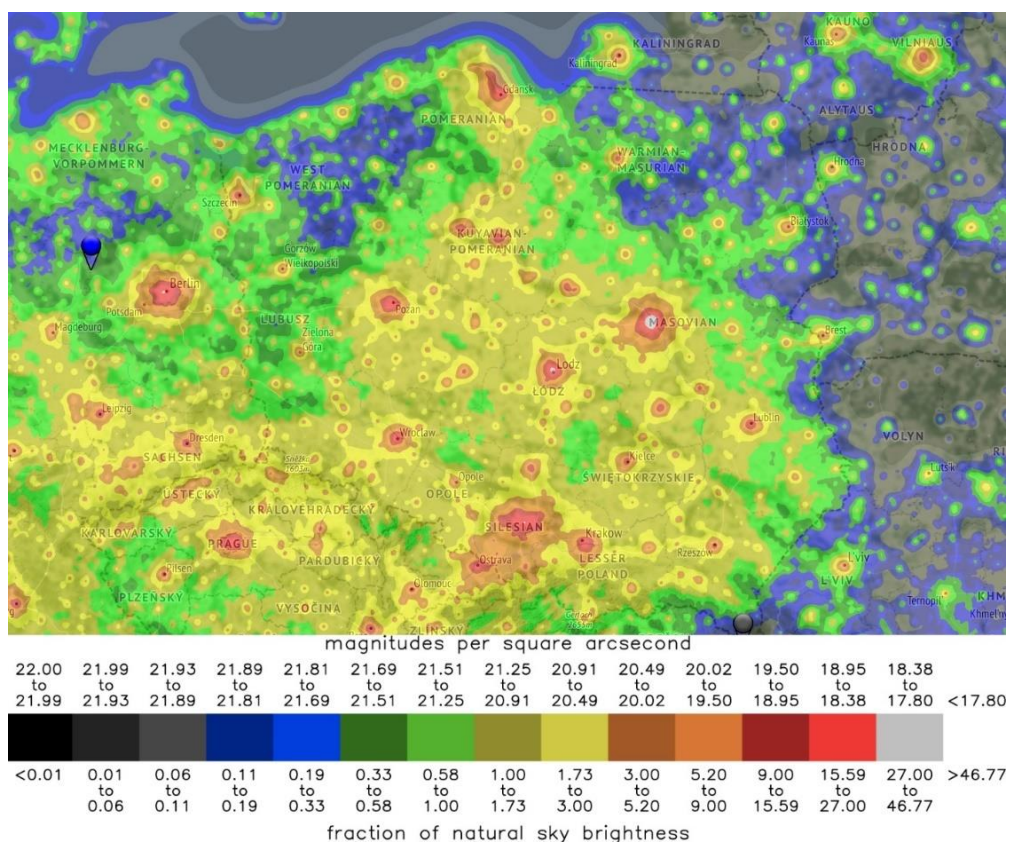


Ryc. 4. Powierzchniowa jasność nocnego nieba wyrażona w jednostce mag/arcsec<sup>2</sup>, przedstawiona w *World Atlas of Light Pollution* na przykładzie Polski (źródło: <https://www.lightpollutionmap.info>).

Rycina 4 przedstawia powierzchniową jasność nocnego nieba na terenie Polski opublikowaną w *World Atlas of Light Pollution*. Do prezentacji kartograficznej wykorzystano skalę spektralną złożoną z 15 przedziałów barwnych. Skala rozpoczyna się od wartości 22 mag/arcsec<sup>2</sup>, co oznacza najbardziej ciemne niebo (niezanieczyszczone), a odstępy między przedziałami odpowiadają skali logarytmicznej. Zaproponowane barwy wykorzystane w tej skali rozpoczynają się od głębokiej czerni (RGB=0,0,0) i zmieniają się kolejno przez niebieską, zieloną, żółto-czerwoną, różową, aż do białej (RGB=255,255,255) oznaczającej reprezentowane wartości poniżej 17,50 mag/arcsec<sup>2</sup>. Rycina 5 przedstawia natomiast fragment mapy z *Light Pollution Atlas* (Falchi i in. 2016). Podział



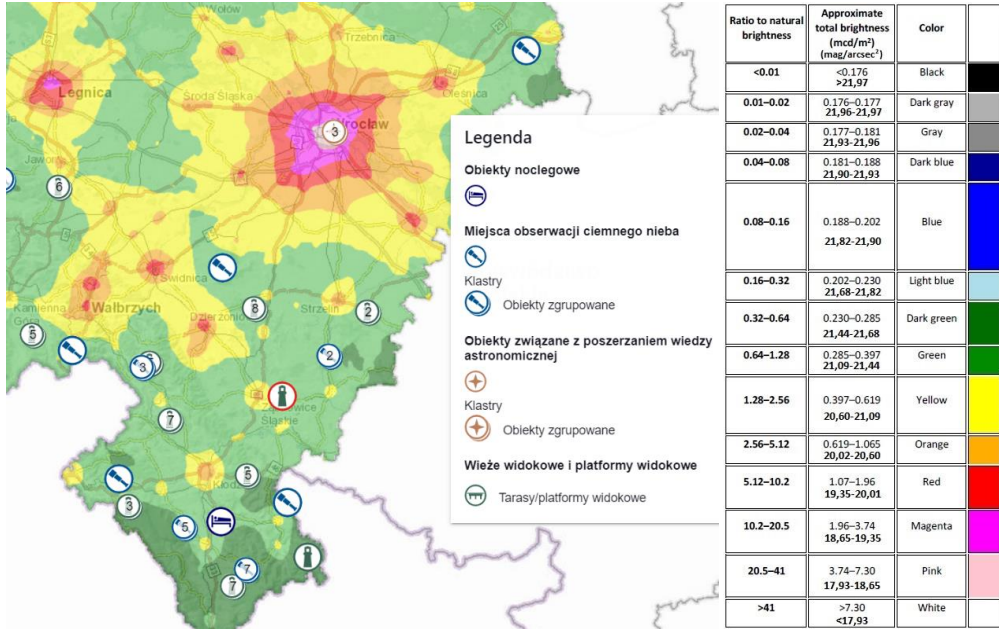
zakresu wykonany został w odniesieniu do tzw. skali *Natural Sky Brightness* (NSB), która określa, ile razy jaśniejsze jest nocne niebo w porównaniu do niezanieczyszczonego naturalnego jego odpowiednika. W oryginale NSB posiadała połowę wydzielonych obecnie przedziałów, a ich granicą była liczba 3, teraz została uzupełniona o pośrednie wydzielienia (Cinzano i in. 2001; Falchi i in. 2016). Podobnie jak poprzednia legenda, jest skalą spektralną z 15 wyróżnionymi przedziałami barwnymi. Różnica między tymi skalami jest wizualnie widoczna. Zastosowane wydzielienia nie pokrywają się i w obu skalach została użyta także inna kolorystyka. W przypadku drugiej skali zamiast koloru różowego wykorzystywany jest kolor szary.



Ryc. 5. Powierzchniowa jasność nocnego nieba wyrażona jednocześnie w jednostkach mag/arcsec<sup>2</sup> oraz NSB, przedstawiona w *Light Pollution Atlas* na przykładzie Polski (źródło: <https://darksitefinder.com/maps/world.html#7/52.177/18.160>).

Metodykę wizualizacji zanieczyszczenia nocnego nieba wykorzystaną w *Light Pollution Atlas* zastosowano do przedstawienia treści na *Mapie Astrofotografii Dolnego Śląska*. Przygotowany tylko w polskiej wersji językowej tematyczny portal służy do rozpowszechniania wiedzy o zjawisku smogu świetlnego i jego

zasięgu przestrzennym szerokiej grupie odbiorców (ryc. 6). Zaprojektowana do niego legenda częściowo odpowiada skali przedstawionej na rycinie 5, jednak posiada inne zakresy zdefiniowanych przedziałów wartości oraz przypisane im odpowiednie kolory.



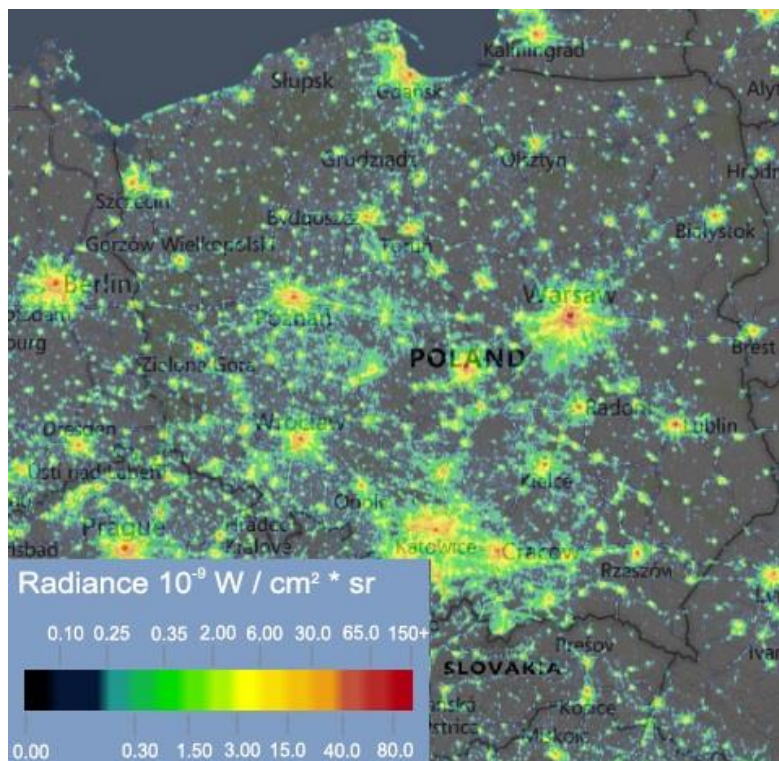
Ryc. 6. Fragment okolic Wrocławia przedstawiony na *Mapie Astrofurystryki Dolnego Śląska* (źródło: <https://geoportal.dolnyslask.pl>).

W przypadku niektórych zasobów danych wykorzystywaną skalą informacyjną do przedstawienia stopnia zanieczyszczenia światłem nocnego nieba jest radiancja, która w sposób ilościowy pokazuje odbiorcy, jak duża ilość światła emitowana jest na jednostkę powierzchni otoczenia na jednostkę kąta bryłowego ( $W/cm^2 * sr$ ). Przykładem użycia takiej skali jest mapa na rycinie 7 utworzona na podstawie zarejestrowanych nocnych obrazów z satelity Suomi NPP (VIIRS-NASA 2022).

Wykorzystana skala w legendzie tej ryciny podzielona została na 14 nierównych przedziałów barwnych i rozpoczyna się od wartości 0 (kolor czarny, RGB=0,0,0). Kolorystyka wykorzystana w tym przypadku jest podobna do dwóch pierwszych skal, jednak kończy się na kolorze czerwonym oznaczającym miejsca, w których występuje duża radiancja wynosząca powyżej  $150 * 10^{-9} W/cm^2 * sr$ .

Innym przykładem przedstawienia radiancji zobrazowanej przez tego samego satelitę (Suomi NPP) są dane przedstawione na portalu tematycznym

WorldView, który codziennie udostępnia zarejestrowane dane obrazowe, w tym nocne zobrazowania satelitarne (ryc. 8).



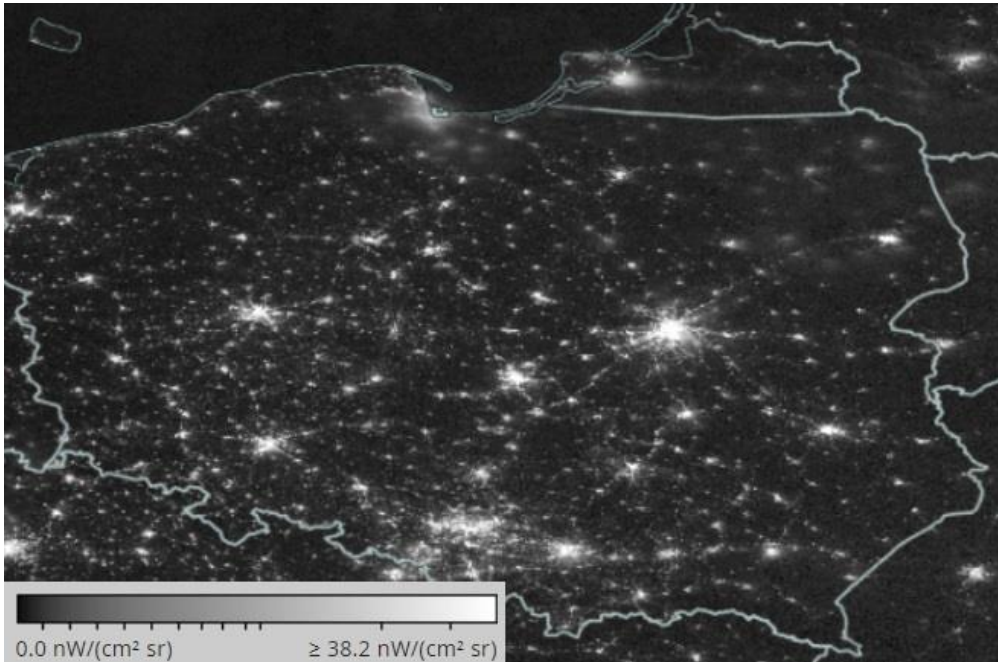
Ryc. 7. Zanieczyszczenie światłem na obszarze Polski w 2021 roku przedstawione w formie radiancji (źródło: <https://www.lightpollutionmap.info>).

Skala jednostek wykorzystana na tej platformie zawiera wartości w przedziale od 0 do  $38,2 \text{ W / cm}^2 * \text{sr}$ , gdzie 0 reprezentowane jest przez kolor czarny (RGB=0,0,0) i oznacza miejsca bez źródeł emisji światła, natomiast wartości powyżej górnej granicy reprezentowane są przez kolor biały (RGB=255,255,255). Wartości pośrednie przedstawione są w sposób ciągły, w odcieniach szarości. W porównaniu do poprzedniej omawianej skali przedstawiającej zanieczyszczenie nieba w formie radiancji, skala ta posiada mniejszy zakres wydzieleni oraz odbiegającą od wcześniej opisanych kolorystykę prezentowanych wartości. Dodatkowo, nie są wyraźnie oddzielone przedziały przez zdefiniowanie ich konkretnych wartości brzegowych.

Na portalu tematycznym WorldView umieszczane są nie tylko analizy radiometryczne zarejestrowanych zobrazowań, ale także pojedyncze zdjęcia, codziennie wykonywane przez satelitę Suomi NPP. Obrazy te są wykonane w odcieniach szarości, przy czym kolor czarny oznacza miejsca bez oświetlenia



zewnątrznego, natomiast biały przedstawia rozświetlone obszary zurbanizowane w ich granicach występowania (ryc. 9).



Ryc. 8. Radiancja przedstawiająca zanieczyszczenie światłem na obszarze Polski w nocy w dniu 26 sierpnia 2022 roku (źródło: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

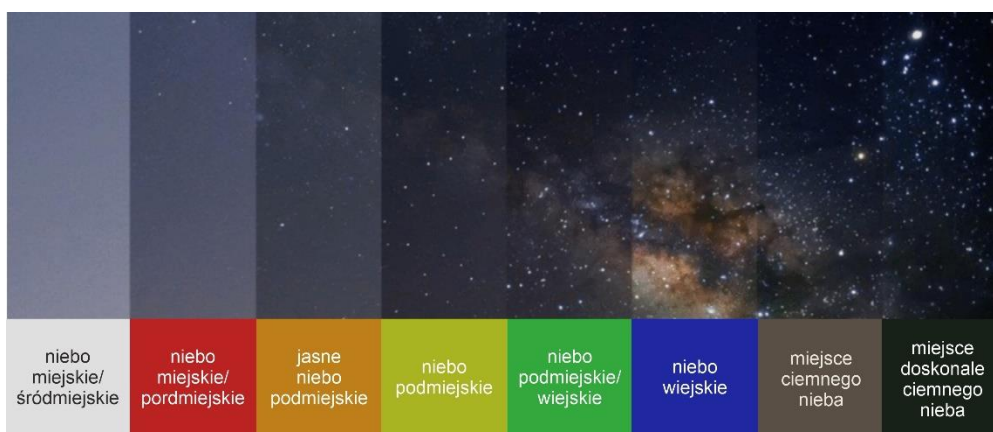
Kolejną metodą oceny zjawiska stosowaną przez osoby zajmujące się tematyką zanieczyszczenia światłem jest skala Bortle'a (Ścieżor 2021). Używana jest ona do szacunkowej oceny jakości nocnego nieba podczas typowych obserwacji astronomicznych. W skali tej wyodrębnionych zostało 9 klas reprezentowanych przez 8 przedziałów barwnych (klasa 8 i 9 wspólnie charakteryzowana jest przez kolor biały). Każda z klas oznacza poziom i zakres widoczności określonych we wzorcu obiektów astronomicznych (ryc. 10).

Wszystkie przedstawione powyżej sposoby wizualizacji kartograficznej zjawiska zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem są wykorzystywane w powszechnych publikacjach i służą do przeprowadzania dalszych analiz o charakterze zarówno ilościowym, jak i jakościowym (Cinzano i in. 2001; Elvidge i in. 2013; Jechow i in. 2019; Levin i in. 2020; Zhang i in. 2020; Ścieżor 2021; VIIRS-NASA 2022; Mander i in. 2023). Zaobserwowanym problemem z poznawczego i interpretacyjnego punktu widzenia jest przedstawianie tych samych wyników rejestracji za pomocą różnych jednostek metrycznych, których często nawet nazewnictwo nie jest formalnie

ujednolicone. Dodatkowym problemem jest ważna potrzeba opracowania właściwego algorytmu przeliczania jednostek z jednego systemu na inny.



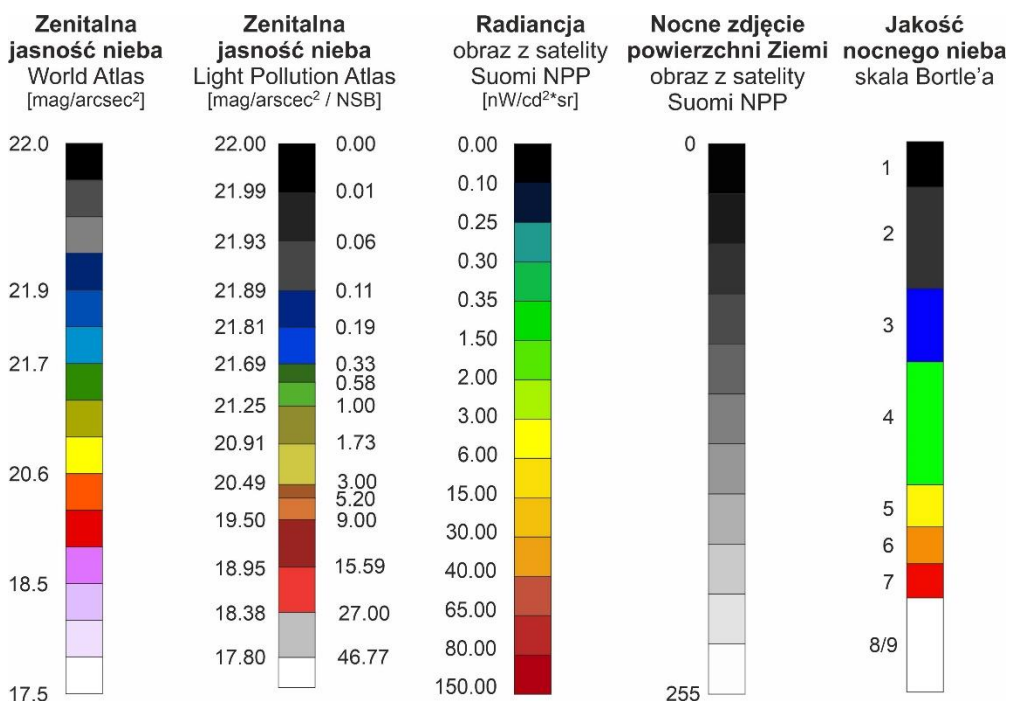
Ryc. 9. Zdjęcie nocne obszaru Polski wykonane w dniu 26 sierpnia 2022 roku (źródło: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).



Ryc. 10. Zdjęcie nocnego nieba widziane z miejsc o różnym natężeniu zanieczyszczenia nieba światłem przedstawione z wykorzystaniem skali Bortle'a.

Rycina 11 przedstawia przybliżone porównanie wszystkich omawianych skal. Analizując to zestawienie można zauważyć zarówno cechy wspólne, jak i wyraźne różnice pomiędzy stosowanymi wizualizacjami. We wszystkich przypadkach najważniejszym podobieństwem jest rozpoczęcie skali barw od

tego samego koloru – czerni, który odnosi się do nieba niezanieczyszczonego. W większości przypadków podobna jest również wartość po przeciwległej stronie skali, oznaczająca obszar najbardziej zanieczyszczony światłem. Porównując w szczegółach przedstawione zestawienie widać odmienne podejście do zagadnienia. Każda wizualizacja ma inną liczbę wydzielanych przedziałów czy określenia ich granic, nawet w przypadku, gdy stosowano tę samą jednostkę pomiarową. W konsekwencji wpływa to na zastosowaną kolorystykę różnicowania klas wartości oraz liczbę wykorzystywanych docelowo barw.



Ryc. 11. Porównanie spotykanych w materiałach kartograficzno-dokumentacyjnych i opisane w rozdziale skale jasności i zanieczyszczenia nocnego nieba światłem.

### Propozycja symboliki kartograficznej dla opracowań tematycznych prezentujących informacje o zanieczyszczeniu światłem nocnego nieba

Autorzy niniejszego rozdziału, na podstawie kilkuletnich własnych doświadczeń i obserwacji terenowych oraz przeprowadzonej analizy dostępnego piśmiennictwa rekomendują przyjęcie ujednoliconej metodyki wizualizacji zanieczyszczenia nocnego nieba sztucznym światłem. Z pragmatycznego punktu widzenia najbardziej czytelną skalą pomiarową jest ta oparta na jednostce mag/arcsec<sup>2</sup> (*magnitudo na sekundę kątową do kwadratu*), która jest szeroko wykorzystywana przez astronomów, biologów oraz geografów, i ma swoje praktyczne uzasadnienie.

Przyjęta skala powinna być skalą otwartą z obu stron i zakładać możliwość występowanie zarówno większych wartości, jak i mniejszych. Pierwszą wartością rozpoczynającą skalę powinna być wartość zbliżona do 22 mag/arcsec<sup>2</sup>, tak jak to przedstawiono we wcześniej przytoczonych przykładach wizualizacji, a zakres wydzieleni powinien jednak wynikać z użytkowego punktu widzenia. Wartość najwyższa reprezentuje ciemne nocne niebo wolne od wszelkich źródeł światła zewnętrznego (Cinzano i in. 2001; Falchi i in. 2016; Hänel i in. 2017). Druga strona skali powinna natomiast posiadać dodatkowe wydzielenia z uwagi, iż jasność nieba mierzona w miastach może wynosić nawet 14–15 mag/arcsec<sup>2</sup>, co przy przyjęciu ostatniego przedziału kończącego się na około 17,50 mag/arcsec<sup>2</sup> uniemożliwia przedstawienie różnic w jasności nieba pomiędzy wybranymi ośrodkami miejskimi (Hänel i in. 2017; Karpińska i Kunz 2019, 2020). Bez tego dodatkowego wydzielenia wszystkie większe miasta świata w prezentowanych wizualizacjach są jednorodne i podobne w odbiorze, co nie jest zgodne z rzeczywistością. Konieczne jest także przyjęcie ujednoczonych przedziałów wartości. W opublikowanych materiałach związanych z jasnością nocnego nieba określone zostały przy okazji różnych aktywności istotne wartości pomiarowe, które mogłyby stać się wartościami granicznymi i posłużyć tworzeniu przedziałów ujednoczonych dla wszystkich wizualizacji. Należą do nich w górnej części skali następujące wartości:

- 21,60 mag/arcsec<sup>2</sup> odpowiadające średniej wartości jasności nieba poniżej atmosfery (Cinzano i in. 2001),
- 21,20 mag/arcsec<sup>2</sup> – opisująca warunki odpowiadające w przybliżeniu luminancji zenitowej pasma widzialnego (IDA 2022); jest to także wymagana przez organizację IDA wartość nocnego nieba służąca do ustanowienia w danym miejscu tzw. Parku Ciemnego Nieba,
- 20,50 mag/arcsec<sup>2</sup> będące granicą widoczności Drogi Mlecznej (Cinzano i in. 2001; Falchi i in. 2016; Hänel i in. 2017),
- 20,21 mag/arcsec<sup>2</sup> – określające niezanieczyszczone niebo sztucznym światłem, ale przy obecności na niebie księżycy w pełni (Cinzano i in. 2001),
- 19,72 mag/arcsec<sup>2</sup> – opisuje ciemne niebo występujące pod koniec zmierzchu żeglarskiego, a ludzie mieszkający w miejscu o takim poziomie jasności nieba nie doświadczają warunków przypominających prawdziwą noc (Cinzano i in. 2001),
- 18,89 mag/arcsec<sup>2</sup> – wielkość ta uznana jest za wartość graniczną, umożliwiającą nocną adaptację ludzkich oczu (Falchi i in. 2016).

W dalszych etapach konieczne jest bardziej szczegółowe doprecyzowanie skali wizualizacji poniżej wartości 18 mag/arcsec<sup>2</sup>. Wiadomym jest, iż na terenach wysoce zurbanizowanych występujące wartości są mniejsze od 17 mag/arcsec<sup>2</sup>,

ale mogą też przyjmować zakres rejestracji nawet 14,50 mag/arsces<sup>2</sup> (Ścieżor i in. 2010; Hänel i in. 2017; Karpińska i Kunz 2020). Z tego względu konieczne jest wydzielenie większej liczby przedziałów obejmujących ten dolny zakres wartości.

Przed naukowcami, zwłaszcza praktykami związanymi z badaniami nad zdrowiem publicznym oraz funkcjonowaniem organizmów żywych w warunkach silnie przekształcanego środowiska przyrodniczego, stoi także wyzwanie dotyczące próby dokładnego wyznaczenia wartości granicznej lub przedziału tych wartości, określającej zakres bezpieczny dla zdrowia i działania człowieka: poziom występowania zanieczyszczenia światłem. Takie działania pomogłoby uświadomić wszystkim mieszkańcom planety, jak duża część z nich zamieszkuje obszary charakteryzujące się negatywnym i uciążliwym oddziaływaniem sztucznego nocnego światła oraz jaki to ma wpływ na współistnienie chorób cywilizacyjnych, powodowanych pośrednio przez to zjawisko. Byłoby to także ważne dla opracowania przyszłych warunków technicznych prowadzenia pomiarów zjawiska, jego monitoringu w czasie oraz ustalenia norm związanych z liczbą okresów przekroczenia ustalonych wartości granicznych w danym czasie (np. roku czy sezonie), skutkujących ogłoszeniem stanu ostrzegawczego, alertem, a także działaniami zaradczymi.

Na podstawie posiadanego doświadczenia autorzy rozdziału proponują, aby w zależności od ustalonych przedziałów, przyjąć, iż kolor od czarnego do niebieskiego definiuje wartości pomiarowe, które sprzyjają dobremu funkcjonowaniu i samopoczuciu człowieka. Taki rozkład kolorów odpowiada zakresowi od naturalnych warunków nocnego nieba, czyli bez obecności zewnętrznych źródeł światła, aż do wartości jasności występującej podczas nocy z księżycem w pełni. Dla przedziału wartości określających naturalne możliwości nocnej adaptacji ludzkiego oka powinny zostać wykorzystane kolory opisujące naturę, np. zieleń, natomiast pomiary pokazujące wartości poniżej tego progu, z założenia powinny ostrzegać czytelników o przekroczeniu parametrów, a więc przyjmować barwy żółto-czerwone.

Powyższe propozycje dotyczą wizualizacji wielkości zanieczyszczenia światłem nocnego nieba, które ze względu na sposób pomiaru i sposób organizacji danych (model rastrowy w przypadku danych teledetekcyjnych lub model wektorowy albo model rastrowy w wyniku interpolacji wyników zebranych z rozproszonej naziemnej sieci czujników) ma zakres powierzchniowy. W wielu jednak sytuacjach pomiary prowadzone są tylko na pojedynczych stanowiskach rejestrujących i wyniki takich obserwacji należy czytelnie przedstawić z wykorzystaniem sygnatury punktowej w miejscu występowania zjawiska. Do tego dochodzi także sytuacja, w której ze względu na

skalę opracowania mapy tematycznej oraz przyjętą generalizację treści należy stosować przekaz zgodny z obowiązującymi wytycznymi technicznymi. Tak jest w przypadku urzędowej *Mapy Sozologicznej Polski* wydawanej w skali 1:50 000 i obejmującej swoim zasięgiem obszar całego kraju (Paślawski 2007). Ten ukierunkowany zasób tematyczny przedstawia stan środowiska przyrodniczego oraz przyczyny i skutki przemian w nim zachodzących pod wpływem różnego rodzaju procesów, głównie o genezie antropogenicznej (*GIS-4...* 2005; Kunz i Kot 2007). Na treść tematyczną składa się sześć poziomów informacyjnych, w tym ten najbardziej rozbudowany, dotyczący degradacji komponentów środowiska przyrodniczego. Treść legendy tej części została podzielona szczegółowo w zależności od obiektu analizy na: degradację powierzchni terenu, lasów, wód powierzchniowych, wód podziemnych oraz degradację powietrza atmosferycznego. W ostatnio wymienionej grupie jest właściwe miejsce do umieszczenia informacji dotyczącej zanieczyszczenia smogiem świetlnym. W związku z tym w legendzie urzędowej mapy sozologicznej w dziale „Degradacja powietrza atmosferycznego” powinien pojawić się symbol *emitora nadmiernego oświetlenia zewnętrznego* (ryc. 12). To wymaga uzupełnienia treści obowiązujących od 2005 roku *Wytycznych Technicznych GIS-4* (2005), nie tylko w zakresie standaryzowanej symboliki zawartej w legendzie mapy, ale także w części opisowej wraz z podaniem definicji oraz wprowadzeniem tego uzupełnienia w tworzonych równocześnie rozbudowanych komentarzach naukowych do tych zasobów. Należy także rozważyć, czy nie należy do wykazu przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko dodać źle zaprojektowanych rozległych iluminacji architektonicznych oraz innych istotnych źródeł światła, których główny kierunek ekspozycji jest w górę lub na boki, a nie w dół (np. wielkopowierzchniowe szklarnie). W przypadku stosowania nowoczesnych rozwiązań oświetleniowych przez władarzy miast, np. zamianie powszechnych do dzisiaj latarni ulicznych sodowych na LED należy taką informację oznaczyć, jako istotny element przeciwdziałania degradacji środowiska przyrodniczego.



Ryc. 12. Proponowana sygnatura punktowa emitora nadmiernego oświetlenia zewnętrznego, jako uzupełnienie treści urzędowej mapy sozologicznej w skali 1:50 000 w części „degradacja powietrza atmosferycznego” (sygnatura została 4-krotnie powiększona, w oryginale jej wysokość powinna wynosić 0,3 cm).

Przetworzona informacja dotycząca zanieczyszczenia światłem i odniesiona lokalnie, jako sygnatura punktowa powinna się także znaleźć w strukturze treści map średnio- i małoskalowych, zwłaszcza map turystycznych czy map



turystyczno-krajobrazowych. Dotyczy to przede wszystkim sytuacji, kiedy odbiorcom takiego opracowania wskazuje się miejsca, w których możliwa jest obserwacja nocnego nieba w warunkach naturalnej ciemności, tj. nieboskłonu niezanieczyszczonego sztucznym światłem. Takie informacje powinny pojawić się nie tylko na mapach turystycznych, ale także w przewodnikach turystyczno-krajobrazowych czy celowo przygotowywanych materiałach promocyjnych danych obszarów służących rozwijaniu astroturystyki. Proponowana lokalizacja miejsc o optymalnych warunkach do obserwacji nocnego nieba byłaby zachęceniem do rozwoju tej formy aktywności oraz wyjątkowym wyróżnikiem danego obszaru dla osób poszukujących takich wyzwań. Proponowana dla tego zakresu tematycznego sygnatura punktowa przedstawiona została na rycinie 13. Byłby to także przyczynek do opracowania zupełnie nowych serii map tematycznych, dotyczących astroturystyki z oznaczeniem potencjalnych miejsc do uprawiania tej aktywności wraz z lokalizacją obserwatoriów astronomicznych czy szkolnych astrobaz, a także granic obszarów ochrony nocnego nieba czy tych, które pretendują do tego wyróżnienia.

Uzupełnieniem na wymienionych mapach oraz portalach czy w przygotowywanych informatorach tematycznych mógłby być także symbol wskazujący na obszary o wysokim zanieczyszczeniu sztucznym światłem nocnego nieba, w których nie ma możliwości w żadnych okolicznościach obserwowania gwiazdozbiorów czy układów ciał niebieskich znanych z opisów oraz przewodników astronomicznych (ryc. 13). Działania takie miałyby przede wszystkim aspekt edukacyjny, który pomagałby w propagowaniu wiedzy o zanieczyszczeniu światłem nocnego nieba, a to powinno się przyczynić do poprawy warunków oświetleniowych w wyznaczonych miejscach. Taką symboliką można oznaczać miasta lub ich dzielnice nieprzyjazne astroturystyce.



Ryc. 13. Propozycja sygnatury punktowej w wersji achromatycznej i monochromatycznej oznaczająca – lokalizację stanowisk do uprawiania astroturystyki (lewo) oraz obszary o wysokim zanieczyszczeniu sztucznym światłem nocnego nieba (prawo) (projekt graficzny: Nikodem Pręgowski, Katedra Projektowania Graficznego, Wydział Sztuk Pięknych, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).

Jak pokazano powyżej, do wizualizacji powierzchniowej danych przestrzennych dotyczących zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba ze zmiennych graficznych Bertina (1967) wykorzystywane są kolor oraz jasność, a w przypadku sygnatur punktowych jeszcze wielkości i kształt.

## Podsumowanie i dyskusja

Spotykane w specjalistycznej literaturze przedmiotu tak różnorodne podejście do wizualizacji danych określających poziom zanieczyszczenie sztucznym światłem nocnego nieba, powoduje duże problemy związane z właściwą interpretacją danych dla wszystkich osób zainteresowanych tematyką. Skutkuje to w dalszej analizie zjawiska dużymi utrudnieniami w porównywaniu danych oraz właściwym wnioskowaniu końcowym. Zdaniem autorów niniejszego opracowania istnieje konieczność rozpoczęcia pogłębionych prac metodycznych nad ujednoczonym opisem zagadnienia, wypracowanym podczas dyskusji z udziałem specjalistów reprezentujących różne dziedziny naukowe, a badających to samo zjawisko z różnych stron i punktów widzenia, a także na różne sposoby. Powyższe działania powinny w pierwszym etapie posłużyć do rozpoczęcia prac nad standaryzacją treści zasobów przestrzennych dotyczących przedstawiania zjawiska zanieczyszczenia światłem nieba, zarówno oddziałującego bezpośrednio nad obszarami zurbanizowanymi, jak i miejscami oddalonymi od skupisk ludzkich. Proponowane jest ujednoczenie stosowanego systemu pomiarowego oraz wykorzystanie jednej jednostki rejestracji poziomu natężenia smogu świetlnego tak, aby dostarczane dane służące dalszym analizom były zrozumiałe dla wszystkich użytkowników i czytelne dla odbiorców opracowań kartograficznych powstałych na ich podstawie. W kolejnym etapie powinna zostać przeprowadzona analiza stosowanych i uwzględnianych przez różne branże zawodowe wytycznych technicznych dotyczących oświetlenia zewnętrznego, co docelowo pozwoliłoby na zaproponowanie spójnych i aktualnych propozycji zapisów prawnych wraz z komentarzami i wyjaśnieniami.

Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba jest coraz bardziej odczuwalną, zwłaszcza przez człowieka, degradacją środowiska naturalnego. Na całym świecie rosnąca grupa interdyscyplinarnych naukowców realizuje liczne pomiary i prace dotyczące tej tematyki. W społeczeństwie, zwłaszcza w większych aglomeracjach miejskich, obserwuje się wzrost zainteresowania poznaniem przyczyn i ich przeciwdziałaniu oraz skutecznym monitoringiem intensywności i zasięgu zanieczyszczenia światłem. Pomimo to, w wielu krajach europejskich nie ma do tej pory prawnych regulacji dotyczących nadmiernej emisji sztucznego światła w nocy. Spośród kilku istniejących metod pomiarowych, pozwalających w różny sposób oceniać wielkość tego zanieczyszczenia, żadna nie została prawnie uznana za właściwą. Problematyczna i niespójna treściowo jest wizualizacja kartograficzna wyników przeprowadzonych pomiarów. W każdej wykorzystywanej grupie metod pomiarowych otrzymywane są wyniki w różnych jednostkach pomiarowych,



a do ich wizualizacji stosuje się mniej lub bardziej różniące się skale z nieujednoczonymi i czasami niezrozumiałymi przedziałami. Dostępność różnych metod pomiarowych jest niewątpliwą zaletą, ułatwiającą szersze poznawanie tego zjawiska, jednak obowiązkiem kartografów jest dbałość o czytelność przekazu i budowę poprawnej warstwy interpretacyjnej. Z tego punktu widzenia, przy poszanowaniu i zachowaniu wieloźródłowości danych pomiarowych, bardzo istotnym elementem jest stworzenie możliwości przeliczenia danej jednostki (nawet w przyjętym przybliżeniu) na inne używane w podobnych pomiarach, tak aby docelowo przy analizie zebranych materiałów z różnych badań nie było wątpliwości w ich odczycie i interpretacji. Ustandaryzowanie skali prezentacji oraz granic wydzieleni powinno być na tyle elastyczne w wykorzystaniu, aby przyjęta końcowa kolorystyka była jednolita dla wyniku otrzymanego na danym obszarze, na którym prowadzone są akwizycje danych, bez względu na zastosowaną metodę pomiarową.

Nadmierna emisja sztucznego światła w nocy jest współcześnie tak ważnym problemem, iż będzie musiała zostać uwzględniana w wytycznych dla nowych serii map środowiskowych i opracowań tematycznych, a także tematycznych zasobach portalowych dotyczących jakości środowiska przyrodniczego. Jest to także element, który coraz częściej pojawia się w wytycznych do sporządzania analiz środowiskowych i tworzenia dokumentów planistycznych. Z tego powodu rozpoczęcie dyskusji nad opracowaniem norm i standardów prezentacji kartograficznej dla mierzonego różnymi sposobami zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba wydaje się bardzo zasadne. W tym procesie nie wolno zapominać o osobach aktywnych turystycznie czy z dysfunkcjami wzroku. Dzięki tym zabiegom możliwe będzie nie tylko oznaczanie miejsc służących obserwacji nocnego nieba czy wzmocnieniu i ukierunkowaniu przekazu graficznego celem właściwego rozumienia tego negatywnego zjawiska, jego skali i wpływu na zdrowie i funkcjonowanie wszystkich organizmów żywych, ale także prowadzenie ukierunkowanej edukacji na wszystkich poziomach wiekowych.

## Literatura

- Bertin J., 1967. *Semiologie graphique. Les diagrammes, les reseaux, les cartes*, Mouton et Gouthier-Villars, La Haye-Paris.
- Cinzano P., Falchi P.F., Elvidge C.D., 2001. The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 328: 689–707.
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., Baugh K.E., 2000. The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 318: 641–657.
- Connors B.M., McConnell A., Routledge R., 2010. Effect of artificial light on marine invertebrate and fish abundance in an area of salmon farming. *Marine Ecology Progress* 419: 147–156.
- Elvidge C.D., Baugh K.E., Zhizhin M., Hsu F.-C., 2013. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network* 35: 62.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2.
- Falchi F., Cinzano P., Elvidge C., Keith D., Haim A., 2011. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management* 92: 2714–2722.
- Falchi F., Ramos F., Bará S., Sanhueza P., Arancibia M.J., Damke G., Cinzano P., 2023. Light pollution indicators for all the major astronomical observatories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 519(1): 26–33.
- Garcia-Saenz A., Sanchez de Miguel A., Espinosa A., Crespo A., Aragonés N., Llorca J., Amiano P., Martín V., Guevara M., Capelo R., Tardón A., Peiró R., Jiménez-Moleón J., Roca Barcelo A., Perez-Gomez B., Dierssen-Sotos T., Fernández T., Moreno-Iribas C., Moreno V., Kogevinas M., 2018. Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain. *Environmental Health Perspectives* 126.
- GIS-4. Mapa sozologiczna Polski w skali 1:50 000. Wytyczne Techniczne*, 2005. GUGiK, Warszawa, 58 s.
- 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., 2017. Measuring night sky brightness: Methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 205: 278–290.
- International Dark-Sky Association, 2022. *The International Dark Sky Places conservation program recognizes and promotes excellent stewardship of the night sky*. <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/> (dostęp: 29.12.2022).
- Jechow A., Hölker F., Kyba C.C.M., 2019. Using all-sky differential photometry to investigate how nocturnal clouds darken the night sky in rural areas. *Scientific Reports* 9: 1391.
- Jechow A, Kolláth Z, Ribas S.J. et al., 2017. Imaging and mapping the impact of clouds on skyglow with all-sky photometry. *Scientific Reports* 7: 6741.

- Jechow A., Kyba C.C.M., Kolláth Z., Lerner A., Hänel A., Shashar N., Hölker F., 2017a. Measuring light pollution with fisheye lens imagery from a moving boat, a proof of concept. *International Journal of Sustainable Lighting* 36(1): 15–255.
- Jones J., Francis C.M., 2003. The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses. *Journal of Avian Biology* 34: 328–333.
- Karpińska D., Kunz M., 2022. Device for automatic measurement of light pollution of the night sky. *Scientific Reports* 12: 16476.
- Karpińska D., Kunz M., 2020. Analysis of light pollution of the night sky in Toruń (Poland). *Civil and Environmental Engineering Reports* 30(4): 155–172.
- Karpińska D., Kunz M., 2020a. Ochrona nocnego nieba – wyzwanie dla Rezerwatu Biosfery Bory Tucholskie. [w:] Kunz M. (red.), *Rola i funkcjonowanie parków krajobrazowych w rezerwatach biosfery*. Wyd. Naukowe UMK, Toruń: 329–346.
- Karpińska D., Kunz M., 2019. Light pollution in the night sky of Toruń in the summer season. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 17: 91–100.
- Kolláth Z., 2010. Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park. *Journal of Physics Conference Series* 218(1): 012001.
- Kołomański S., 2015. Zanieczyszczenie światłem i ciemność. [w:] Wiśniewska M.R., Tomasik K. (red.), *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, Wyd. UW, Warszawa: 29–46.
- Kunz M., Kot R., 2007. Doświadczenia Instytutu Geografii UMK w zakresie sporządzania numerycznych map sozologicznych. [w:] Kunz M. (red.), *Systemy informacji geograficznej w praktyce (studium zastosowań)*. Wyd. Naukowe UMK, Toruń: 139–147.
- 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., Wang Z., Shrestha R.M., Elvidge C.D., 2020. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment* 237: 111443.
- Light pollution reduction measures in Europe, 2022*. Working paper for international workshop “Light Pollution 2022”, during the Czech Presidency of the Council of the European Union, Ministry of the Environment of the Czech Republic, 60 p.
- Mander S., Alam F., Lovreglio R., Ooi M., 2023. How to measure light pollution – a systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*.
- Pasławski J., 2007. O mapach środowiska naturalnego Polski w skali 1:50 000. [w:] Ostaszewska K., Szumacher I., Kulczyk S, Malinowska E. (red.), *Znaczenie badań krajobrazowych dla zrównoważonego rozwoju*. Wyd. UW, Warszawa: 283–299.
- Stevens R.G., 2009. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: Assessment of existing evidence. *International Journal of Epidemiology* 38: 1–8.
- Szlachetko K. (red.), 2022. *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego*. Instytut Metropolitalny, Gdańsk, 48 s.
- Ścieżor T., 2021. Effect of Street Lighting on the Urban and Rural Night-Time Radiance and the Brightness of the Night Sky. *Remote Sensing* 13: 1654.

- Ścieżor T., 2021a. Metody pomiaru jasności nocnego nieba. [on-line] <http://lightpollution.pk.edu.pl/SOCN/metody.php> (dostęp: 10.12.2021).
- Ścieżor T., 2020. The impact of clouds on the brightness of the night sky. *Journal of Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer* 247.
- Ścieżor T., Czaplicka A., 2020. The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 254: 107168.
- Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., 2010. Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej. *Inżynieria Środowiska* 388. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- VIIRS-NASA 2022. *Light Pollution Map*, <https://www.lightpollutionmap.info> (dostęp: 29.12.2022).
- Zhang C., Pei Y., Li J., Qin Q., Yue J., 2020. Application of LuoJia 1-01. Nighttime Images for Detecting the Light Changes for the 2019 Spring Festival in Western Cities. *Remote Sensing* 12: 1416.

## Streszczenie

Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba jest zjawiskiem coraz powszechniej obserwowanym na całym świecie i przedstawianym w formie map tematycznych. Głównym jego źródłem jest nieprzemysłana bądź źle zaprojektowana instalacja zewnętrznych źródeł oświetlenia. Występuje ono głównie nad obszarami zurbanizowanymi, ale oddziałuje zarówno na środowisko miejskie jak i na tereny do niego przylegające. Problem nadmiernej emisji sztucznego światła w nocy i powodującej przez nią negatywnych skutków stał się już na tyle istotny i globalny w swoim zasięgu, iż zaczęto poszukiwać efektywnych i czytelnych metod prezentacji kartograficznej tego zjawiska. Pomimo rosnącego zainteresowania tematem oraz stosowania kilku niezależnych metod i sposobów pomiaru wielkości tego antropogenicznego zanieczyszczenia, nie opracowano dotychczas norm prawnych i użytkowych związanych z jego występowaniem. Brakuje także wytycznych dotyczących spójnego i ukierunkowanego na odbiorcę sposobu przedstawiania rozkładu przestrzennego, w tym przekonujących i łatwych w odbiorze treści metod wizualizacji kartograficznej. W literaturze przedmiotu dostępne są przykłady prezentacji wyników pomiarów zanieczyszczenia sztucznym światłem nocnego nieba, które jednak opracowane zostały z wykorzystaniem różnych skal barwnych, często w uznaniowych przedziałach i jednostkach pomiarowych. Rozdział przedstawia przegląd spotykanych w literaturze przedmiotu skal i jednostek pomiarowych opisujących zjawisko zanieczyszczenia światłem nocnego nieba. W przeprowadzonych rozważaniach zwrócono uwagę na różnice między skalami pomiarowymi oraz ich wpływem na interpretację wyników. Przedstawiono także propozycje ujednoczenia metody wizualizacji kartograficznej rozkładu przestrzennego i sposobów prezentacji wyników pomiarów smogu świetlnego.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, smog świetlny, skala barw, wizualizacja kartograficzna, symbolizacja.

## **Issues related to cartographic visualisation of light pollution measurements**

### **Summary**

Light pollution of the night sky is a phenomenon increasingly observed around the world and reported in the form of thematic maps. The major contributor to light pollution is ill-adjusted or inappropriately designed artificial lighting by outdoor light sources. The phenomenon occurs mainly over urban areas, but affects both the urban environment and the areas adjacent to it. The problem of excessive artificial light emission at night and the negative effects it causes has already become so serious and global in its impact that effective and comprehensible methods of cartographic presentation of this phenomenon have been explored. The literature on the subject provides examples of how to present the results of measurements of light pollution of the night sky, but these have been developed using different colour scales, often in discretionary ranges and units of measurement. This paper presents an overview of the measurement scales and units found in the literature to describe the phenomenon of light pollution that obscures the night sky. The differences between measurement scales and how they affect interpretation of results are discussed. Furthermore, a recommendation is made for a standardised method of cartographic visualisation of the spatial distribution and presentation of light smog measurement results.

**Key words:** light pollution, light smog, colour scale, cartographic visualization, symbolisation.

### **Dane kontaktowe autorów:**

**Mieczysław Kunz**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: met@umk.pl

**Dominika Karpińska**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: karpinskadominika@doktorant.umk.pl

Agnieszka Machnowska

## Zrównoważone kształtowanie oświetlenia zewnętrznego - narzędzia możliwe do zastosowania na poziomie gminy

### Wprowadzenie

Intensywnie oświetlone miasto postrzegane jest jako wysoko rozwinięte, bogate i bezpieczne (Zielinska-Dabkowska i in. 2023). Negatywne skutki nadmiernego oświetlenia często nie są dostrzegane przez władze samorządowe, pomimo, że zadaniem własnym gminy jest zaspokajanie zbiorowych potrzeb wspólnoty, w szczególności obejmujących sprawy ładu przestrzennego oraz ochrony środowiska i przyrody. Obowiązki te powinny znaleźć odzwierciedlenie w dokumentach strategicznych i programujących oraz politykach.

Z uwagi na funkcje pełnione przez duże miasta, takie jak np. Warszawa, redukcja intensywności zanieczyszczenia światłem do poziomu umożliwiającego obserwację nocnego nieba, może jednak okazać się bardzo trudna (Łopuszyńska 2019). Z tego powodu należy dążyć do minimalizowania niekorzystnego oddziaływania sztucznego światła w skali lokalnej, ponieważ właśnie ono najbardziej wpływa na zdrowie ludzi i zwierząt oraz roślin.

### Redukcja zanieczyszczenia światłem a planowanie przestrzenne

Głównym dokumentem określającym kierunki rozwoju gminy jest jej strategia rozwoju. Definiuje ona także wizję oraz wyznacza cele strategiczne i cele operacyjne gminy. Strategia #Warszawa2030 odnosi się m.in. do podniesienia jakości środowiska przyrodniczego poprzez ograniczenie emisji zanieczyszczeń. Cel ten ma odzwierciedlenie w *Programie ochrony środowiska dla Miasta Stołecznego Warszawy na lata 2021–2024* — dokumencie wykonawczym wyżej wymienionej strategii. W programie tym zawarto wytyczne, dotyczące

sposobów kształtowania oświetlenia przestrzeni publicznych. Pomimo dużego stopnia ogólności tych wytycznych, pojawienie się tematu zanieczyszczenia światłem w programie stało się przyczynkiem do dalszej dyskusji na ten temat w innych dokumentach miejskich, w tym w polityce przestrzennej miasta.

Obecna polityka przestrzenna wyrażona w *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Stołecznego Warszawy* przyjęta została w 2006 roku i sporządzana była na podstawie innych założeń i w kontekście odmiennych od dzisiejszych uwarunkowań. Z tego względu władze stolicy zdecydowały się na zdefiniowanie na nowo jej celów i kierunków w tym zakresie tematycznym.

Wśród celów nowo sporządzanego studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego znalazło się zatrzymanie rozlewania się miasta na tereny dotychczas niezurbanizowane. Zjawisko to skutkuje bowiem pojawianiem się sztucznego światła w dotąd nieoświetlonych miejscach, co nie pozostaje bez wpływu na tamtejsze ekosystemy. Dodatkową podstawą do podjęcia tego tematu w projekcie studium jest nałożony na gminy obowiązek kształtowania rozwoju jako zrównoważonego (art. 71, ust. 1 *Prawo ochrony środowiska*).

Z uwagi na brak umocowania w przepisach prawa, a przede wszystkim brak dopuszczalnych poziomów emisji, zapisy projektu studium dotyczące ochrony przed zanieczyszczeniem światłem skonstruowane zostały jako rekomendacje. Zapisy odnoszą się do redukcji tego zjawiska na terenach cennych przyrodniczo oraz ograniczenia ucieczki światła, przewymiarowania źródeł oświetlenia, a także kształtowania nocnego krajobrazu miasta. Na poziomie ogólnym wskazano, że redukcja zanieczyszczenia światłem i jego uciążliwości wymaga dostosowania oświetlenia zewnętrznego do uwarunkowań, wynikających głównie z następujących zmiennych:

- zagospodarowania i przeznaczenia terenu,
- charakteru i walorów krajobrazu,
- potrzeby zapewnienia warunków umożliwiających niezakłócony przebieg procesów przyrodniczych.

Odnosząc się do szczegółowych zapisów, w projekcie przewidziano rekomendacje dotyczące zarówno kwestii przestrzennych (unikanie iluminacji budynków poza obszarem urbanizacji), technicznych (np. lista terenów i obiektów, na które nie powinno się kierować źródła światła zewnętrznego, unikanie iluminacji roślinności), jak i sposobu kształtowania zagospodarowania. Te ostatnie zalecenia najłatwiej przenieść do zapisów w miejscowych planach

zagospodarowania przestrzennego, ponieważ odnoszą się one bezpośrednio do zakresu ich zawartości. Ponadto projekt studium przewiduje m.in.:

- dystansowanie zabudowy mieszkaniowej, mieszkaniowo-usługowej, zamieszkania zbiorowego oraz zabudowy usług powszechnych, w szczególności ochrony zdrowia, oświaty, opieki nad dziećmi do lat 3 i opieki społecznej, od obiektów mogących wiązać się z intensywnym oświetleniem zewnętrznym (np. przemysł, logistyka, składy, wielkopowierzchniowe obiekty handlowe, stadiony sportowe, drogi ekspresowe) oraz ich buforowanie pasami zieleni izolacyjnej,
- izolowanie terenów cennych przyrodniczo od obiektów mogących wiązać się z intensywnym oświetleniem zewnętrznym.

Analizując nocne zdjęcie Warszawy (ryc. 1), można zidentyfikować tereny o różnych funkcjach: najjaśniejsze centrum miasta oraz emitujące światło zabudowania w większości mieszkaniowe i usługowe, a także liniowe źródła – ulice.



Ryc. 1. Warszawa nocą (opracowane na podstawie [www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/)).



Ciemniejsze miejsca położone bliżej centrum to głównie różnego rodzaju obszary z wysokim udziałem roślinności np. parki, cmentarze, ogrody działkowe, których oświetlenie nie jest aż tak intensywne, jak terenów związanych z zabudową. Natomiast pojedyncze bardzo jasne obiekty oddalone od centrum to przede wszystkim duże centra handlowe, hale magazynowe i produkcyjne oraz zabudowa związana z obsługą miasta (np. lotnisko, oczyszczalnia ścieków). Znajdujące się na obrzeżach miasta ciemne obszary to tereny niezabudowane (np. leśne, rolne, roślinności spontanicznej i naturalnej). Są one nieoświetlone lub oświetlone w niskim stopniu. Zabudowa wkraczająca na te tereny związana jest z pojawianiem się kolejnych źródeł oświetlenia: liniowych (drogi) oraz obszarowych (głównie zabudowa mieszkaniowa). Nowe źródła światła negatywnie wpływają na funkcjonowanie przyrodnicze tych terenów i świadczenie przez nie usług ekosystemowych.

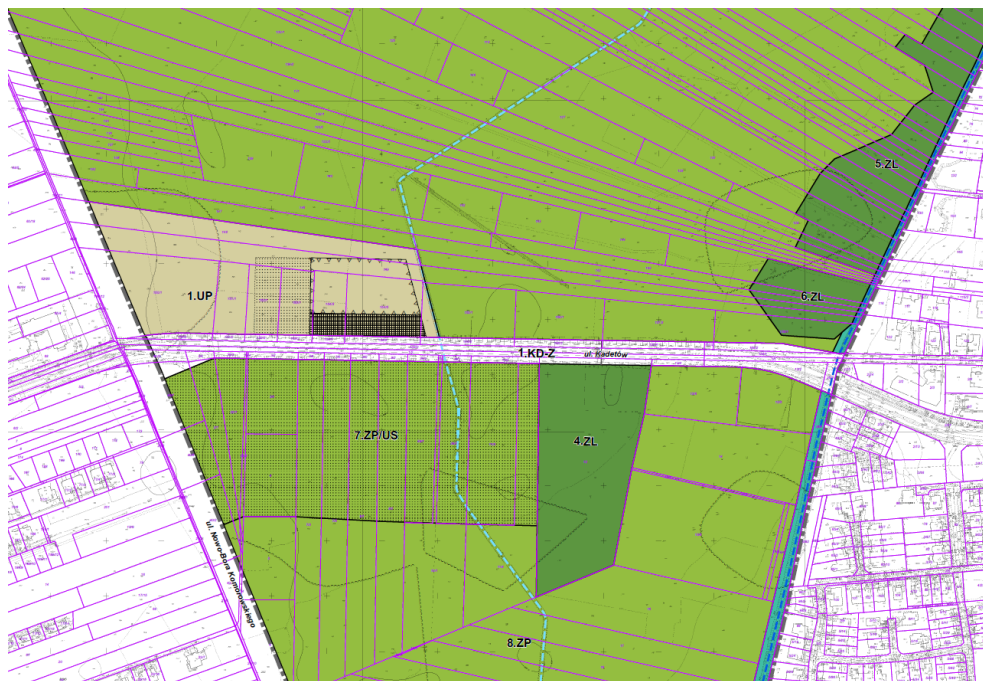
Regulacje przewidziane w projekcie studium, przeniesione do miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego, mogłyby skutecznie zatrzymać proces suburbanizacji i w konsekwencji zapobiec narażaniu terenów cennych przyrodniczo na negatywne oddziaływanie sztucznego oświetlenia.

Pozytywnym przykładem miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego, które uwzględniają kwestię zanieczyszczenia światłem, są dokumenty dla ulicy Kadetów i Zakola Wawerskiego. W planach tych zawarte zostały zapisy w formie nakazów, odnoszące się do stosowania odpowiednich rozwiązań, w tym: konstrukcji opraw świetlnych, systemów regulujących moc oświetlenia czy sposobu rozmieszczenia, które nie powodują nadmiernej emisji światła i nie są uciążliwe dla ludzi i innych organizmów żywych.

Ponad zapisy odnoszące się bezpośrednio do rozwiązań technicznych, ustalenia miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego mogą wspierać kształtowanie zabudowy w sposób chroniący przed zanieczyszczeniem światłem. Przykładem są miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego rejonu ulicy Kadetów. Plan ten obejmuje część Zakola Wawerskiego, które włączone zostało do Warszawskiego Obszaru Chronionego Krajobrazu i stanowi istotny element zielonej infrastruktury Warszawy.

Zapisy planu zakazują lokalizacji budynków, w tym niewymagających pozwolenia na budowę, na całym obszarze planu, z wyłączeniem terenu 1.UP (§ 11, pkt 7). Teren 1.UP zlokalizowany został w sąsiedztwie istniejącej zabudowy (ryc. 2), aby jego ingerencja w przyrodę Zakola Wawerskie była jak najmniejsza. Na rysunku planu zaznaczona została strefa wejściowa do budynku wyłącznie od strony ulicy Kadetów. Dokument ustala dla tej strefy m.in. urządzenie powierzchni przeznaczonej dla ruchu pieszego w sposób

podkreślający główne wejście do budynku. Ponadto na terenie 1.UP zawarto strefę lokalizacji urządzeń sportowych i rekreacyjnych, również od strony ulicy Kadetów. Zaprojektowanie takiego sposobu zagospodarowania terenu 1.UP połączone z zastosowaniem wcześniej wspomnianych zapisów dotyczących kwestii technicznych może przyczynić się do tego, że oświetlenie nowej zabudowy zaproponowane zostanie jedynie od strony ulicy. W znaczącym stopniu ograniczy to wpływ nowych źródeł światła na okoliczne tereny Warszawskiego Obszaru Chronionego Krajobrazu.



Ryc. 2. Fragment miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego rejonu ulicy Kadetów (źródło: <https://architektura.um.warszawa.pl/>).

Podkreślić należy to, że *Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym* przewiduje rozwój zabudowy, nie tylko na podstawie planów miejscowych. W przypadku braku takiego planu, zabudowa odbywa się zgodnie z wydaną decyzją o warunkach zabudowy. Zabudowa powstająca w ten sposób rozprzestrzenia się w mniej kontrolowany sposób, przez co istotnie zwiększa się ryzyko intensyfikacji zanieczyszczenia światłem.

Rozwiązania mające na celu minimalizowanie negatywnych skutków związanych z powstawaniem nowych źródeł sztucznego światła są wymogami, które mogą znaleźć swoje miejsce w decyzjach o środowiskowych uwarunkowaniach. Decyzje te odnoszą się do konkretnych inwestycji i wskazują,

w jaki sposób należy je wykonać, aby w jak najmniejszym stopniu wpływały negatywnie na stan środowiska. Decyzje o środowiskowych uwarunkowaniach wydawane są po przeprowadzeniu przez odpowiednie organy oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko. Procedura jest obowiązkowa w przypadku inwestycji zaliczonych do przedsięwzięć, które mogą znacząco oddziaływać na środowisko.

W decyzjach wydawanych w Warszawie znaleźć można dwa warunki, które ograniczają wpływ zanieczyszczenia światłem:

- na etapie realizacji i eksploatacji stosować oświetlenie obojętne dla zwierząt, o niskim lub zerowym poziomie emisji widma z zakresu UVB, o strumieniu światła skierowanym do dołu; jest to uniwersalny warunek, mający na celu ochronę nocnej fauny i może mieć zastosowanie przy każdej inwestycji,
- w celu zminimalizowania zanieczyszczenia światłem, na ciągach komunikacyjnych zastosować sterowanie oświetleniem o zmniejszającym się natężeniu światła w przypadku braku ruchu.

W obecnym stanie prawnym istnieje obawa, że wymienione zapisy odnoszące się w bezpośredni sposób do rozwiązań technicznych mogą nie mieć odzwierciedlenia w realizacjach prywatnych inwestorów, ponieważ brak jest narzędzi umożliwiających odpowiednim organom egzekwowanie ich stosowania.

Główne źródła sztucznego światła w mieście to oświetlenie ulic, oświetlone reklamy (ryc. 3), wyświetlacze (ryc. 4a i b) i iluminacje budowli i budynków (ryc. 5a) oraz drzew (ryc. 5b).



Ryc. 3. Reklama wolnostojąca z własnym oświetleniem zewnętrznym, rejon ulicy Batorego (fot. Agnieszka Machnowska).

Oświetlenie ulic uregulowane zostało w przepisach odpowiednich ustaw i norm, natomiast kwestię tablic reklamowych i urządzeń reklamowych regulują tzw. uchwały krajobrazowe, przyjmowane przez rady gmin na podstawie przepisów *Ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym* (art. 37a).



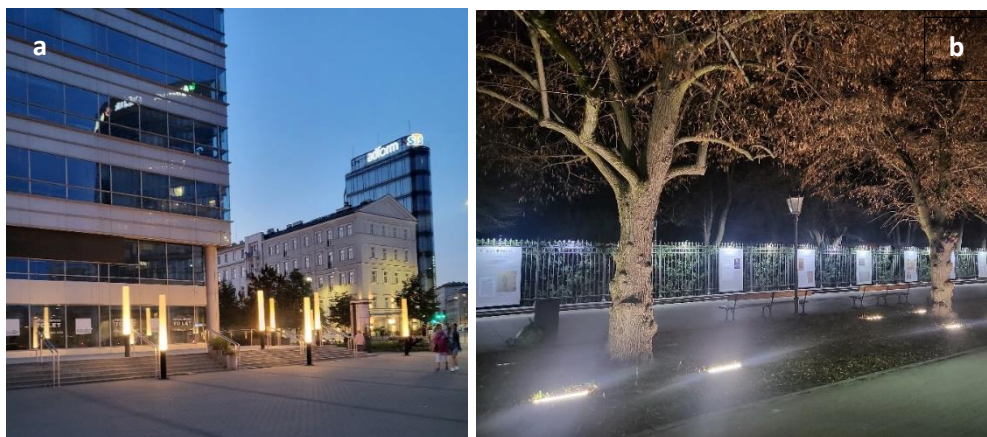
Ryc. 4. Wyświetlacz zamontowany w budynku biurowym na Placu Unii Lubelskiej (a) oraz jego oddziaływanie (b) (fot. Agnieszka Machnowska).

Uchwała krajobrazowa jest dokumentem, który bezpośrednio może wpłynąć na zmniejszenie intensywności zanieczyszczenia światłem w skali lokalnej. Stanowi obszarowe narzędzie ochrony nie tylko krajobrazu kulturowego, ale także naturalnego. Uchwała nie zawiera ustaleń odnoszących się w bezpośredni sposób do zanieczyszczenia światłem, jednak konsekwencją jej przyjęcia będzie zmniejszenie liczby źródeł emitujących światło lub zmniejszenie natężenia tego światła.

Projekt dokumentu zaprezentowany przez Urząd Miasta Stołecznego Warszawy zakłada różne zakazy i nakazy odnoszące się zarówno do stosowanych technologii urządzeń reklamowych, jak i miejsc ich lokalizacji. Przykładowo konsultowana wersja projektu nie dopuszcza:

- sytuowania sztyldów emitujących światło o zmiennym natężeniu lub kolorze (§ 4, pkt 2c),
- sytuowania tablic reklamowych i urządzeń reklamowych niebędących sztyldami na gruntach rolnych i gruntach leśnych lub na terenach parków, cmentarzy i ogrodów jordanowskich oraz terenach wyznaczonych w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego jako tereny zieleni urządzonej (§ 8, pkt 3b i 3c),
- sytuowania tablic reklamowych i urządzeń reklamowych niebędących sztyldami eksponujących reklamę poprzez jej wyświetlanie na ekranie, o ile nie stanowią one jednocześnie wyświetlaczy i nośników reklamowych formatu małego (§ 8, pkt 3e).

Projekt uchwały zakłada trzy rozmiary nośników reklamowych (tj. tablic reklamowych lub urządzeń reklamowych): mały, średni i duży. Zgodnie z definicjami zawartymi w uchwale, dwa pierwsze nośniki nie mogą posiadać własnego oświetlenia zewnętrznego (§ 2, pkt 12–14). Dodatkowo lokalizacje, w których można sytuować wolnostojące tablice reklamowe i urządzenia reklamowe niebędące sztyldami, określone zostały w załączniku graficznym do uchwały. Ograniczy to znacząco lokalizowanie nośników dużego formatu, co do których nie zapisano zakazu posiadania własnego oświetlenia zewnętrznego.



Ryc. 6. Iluminacja związana z biurowcem, oświetlenie skierowane w górę, ul. Waryńskiego (a), iluminacja rzędu drzew, al. Ujazdowskie (b) (fot. Agnieszka Machnowska).

Ponadto projekt wskazuje także minimalne odległości od budynków, zezwalające na sytuowanie nośników reklamowych w formie wolnostojącej oraz słupów ogłoszeniowo-reklamowych (§ 11, ust. 2 pkt 2a). W przypadku nośnika reklamowego formatu dużego odległość ta ma wynosić 20 metrów. Regulacje te mogą korzystnie wpłynąć na zminimalizowanie oddziaływania sztucznego światła na mieszkanki i mieszkańców Warszawy.

Ustawodawca wyposażył uchwały krajobrazowe w narzędzie egzekwowania jej zapisów (art. 37d *Ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym*). Wprowadzona została możliwość nałożenia kary pieniężnej na podmiot, który umieścił tablicę lub urządzenie reklamowe niezgodne z powyższymi przepisami.

## Podsumowanie

Z przytoczonych przykładów można wnioskować, że planowanie przestrzenne jest narzędziem wspomagającym miasta w redukcji zanieczyszczenia światłem. Zrównoważone planowanie przestrzenne może zahamować rozlewanie się miasta, które związane jest z powstawaniem nowych źródeł sztucznego światła, oraz w taki sposób kształtować rozmieszczenie poszczególnych funkcji, aby

zapobiegać lokalizowaniu konkretnych usług i produkcji wiążących się z intensywnym oświetleniem, głównie w sąsiedztwie zabudowy mieszkaniowej i terenów cennych przyrodniczo.

Dodatkowo gminy posiadają możliwość zastosowania zasad związanych ze zrównoważonym kształtowaniem oświetlenia zewnętrznego na terenach, których są właścicielami i którymi zarządzają. Zasady te wdraża Warszawa m.in. poprzez wymianę opraw oświetleniowych na latarniach przy drogach krajowych, wojewódzkich i powiatowych, a także gminnych. Wśród korzyści związanych z wymianą oświetlenia można wyliczyć: oszczędność energii elektrycznej oraz zastosowanie temperatury barwowej na poziomie 3000K. Podobny projekt prowadzony jest na terenie Parku Skaryszewskiego im. Ignacego Jana Paderewskiego. W tym przypadku nowe oświetlenie będzie zaprogramowane z uwzględnieniem cyklu dnia i nocy oraz potrzeby zarówno odwiedzających park ludzi, jak i mieszkających w nim zwierząt. Oprawy będą zmieniać temperaturę barwową w określonych przedziałach czasowych. Wiezorami będzie to 3000K, tak jak na ulicach, a od godziny 22.00 do północy światło będzie cieplejsze (2600K). Z kolei od północy do świtu temperatura barwowa zmieni się jeszcze bardziej i osiągnie wartość 2200K.

Działania takie poza wspomnianymi korzyściami posiadają także walor edukacyjny, który może przyczynić się do poznania i zrozumienia tego zagrożenia i podjęcia szerszej dyskusji społecznej na ten temat.

## Literatura

- Łopuszyńska A., 2019. Analiza oświetlenia przestrzeni publicznej osiedla Nadodrze w śródmieściu Wrocławia pod względem występowania zjawiska zanieczyszczenia światłem. [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badań Kosmicznych PAN. Warszawa: 85–104.
- Zielinska-Dabkowska K.M., Schernhammer E.S., Hanifin J.P., Brainard G.C., 2023. Reduction nighttime light exposure in the urban environment to benefit human health and society. *Science* 380: 1130–1135.

## Przepisy prawne

- Ustawa o informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz ocenach oddziaływania na środowisko z 3 października 2008 r.* (Dz.U. z 2023 r., poz. 1094).
- Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym z 27 marca 2003 r.* (Dz.U. z 2023 r., poz. 977).
- Ustawa Prawo ochrony środowiska z 27 kwietnia 2001 r.* (Dz.U. z 2023 r., poz. 2256).
- Ustawa o samorządzie gminnym z 8 marca 1990 r.* (Dz.U. z 2023 r., poz. 40).



## **Dokumenty planistyczne**

*Miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego w rejonie ulicy Kadetów*, Uchwała Nr LXXIII/2412/2022 Rady m.st. Warszawy z 8 grudnia 2022 r.

*Miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego Zakola Wawerskiego*, Uchwała Nr LXXIII/2411/2022 Rady m.st. Warszawy z 8 grudnia 2022 r.

*Program ochrony środowiska dla m.st. Warszawy na lata 2021–2024*, Uchwała Nr XLVII/1470/2021 Rady m.st. Warszawy z 15 kwietnia 2021 r.

*Strategia rozwoju m.st. Warszawy do 2030 roku (#Warszawa2030)*, Uchwała Nr LXVI/1800/2018 Rady m.st. Warszawy z 10 maja 2018 r.

*Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy*, Uchwała Nr LXXXII/2746/2006 Rady m.st. Warszawy z 10 października 2006 r. z późn. zm.

*Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy* – projekt, wersja wyłożona do publicznego wglądu w dniach od 2 czerwca do 6 września 2023 r.

*Uchwała krajobrazowa dla Warszawy* – uchwała w sprawie zasad i warunków sytuowania obiektów małej architektury, tablic reklamowych i urządzeń reklamowych oraz ogrodzeń – projekt, wersja wyłożona do publicznego wglądu w dniach od 24 lutego do 31 marca 2023 r.

## Streszczenie

Zanieczyszczenie światłem stanowi zagrożenie dla środowiska, podobnie jak zanieczyszczenie powietrza pyłami zawieszonymi oraz hałas. Celem badań była identyfikacja narzędzi umożliwiających władzom gminy w skali lokalnej redukcję zanieczyszczenia światłem oraz jego negatywnych skutków. Brak obowiązujących aktów prawnych i obligatoryjnych norm, a także sankcji za nadmierną emisję światła do środowiska, utrudniają odpowiedzialne kształtowanie oświetlenia zewnętrznego. Z tego względu skutecznych narzędzi wspomagających redukcję tego zanieczyszczenia należy szukać wśród innych rozwiązań, które mogą zostać wykorzystane przez władze gminy. Jednym z takich rozwiązań jest uchwała krajobrazowa. Reguluje ona m.in. zasady lokalizowania nośników reklam, które zalicza się do emitatorów światła. Uchwała ta daje możliwość przypisywania konkretnym miejscom odpowiednich typów nośników reklam, zakazywania lokalizowania ich na wybranych terenach (np. na gruntach leśnych). Inne narzędzie stanowi miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego (MPZP). Rolą planu jest ustalenie przeznaczeń i zasad zagospodarowania konkretnych terenów. Umożliwia on odpowiednie rozlokowanie poszczególnych przeznaczeń w taki sposób, aby zabudowa mieszkaniowa była izolowana od funkcji, z którymi związana jest nadmierna emisja światła (np. centra handlowe, obszary przemysłowe czy magazynowe). Ponadto w planie miejscowym można zawrzeć zapisy, w postaci rekomendacji bądź nakazów, odnoszące się do zapobiegania zanieczyszczeniu światłem. Ich przełożenie na rozwiązania techniczne zastosowane na terenach będących własnością prywatną jest ograniczone, jednak ważna jest ich wartość edukacyjna i świadomość władz danej gminy. Na potrzeby rozdziału przeanalizowane zostały zapisy wybranych dokumentów m.st. Warszawy, w tym projektu uchwały krajobrazowej oraz miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego. Analiza dokumentów wykazała, że efektywne narzędzia mające wpływ na redukcję zanieczyszczenia światłem i jego negatywnych skutków znaleźć można w obszarze planowania i zagospodarowania przestrzennego.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, planowanie przestrzenne, uchwała krajobrazowa.



## **Sustainable development of outdoor lighting – tools that can be used at the municipal level**

### **Summary**

Light pollution is a threat to the environment, as is particulate matter and noise pollution. The aim of the study was to identify tools that enable municipal authorities to reduce light pollution and its negative effects on a local scale. The lack of applicable legal acts and mandatory standards, as well as sanctions for excessive light emission into the environment, make it difficult to develop outdoor lighting responsibly. For this reason, appropriate tools supporting the reduction of this pollution should be sought among other solutions that can be used by the commune authorities. One of such solutions is a landscape resolution. It regulates e.g. rules for locating advertising media that can be classified as light emitters. It gives the possibility of assigning appropriate types of advertising media to specific places, prohibiting the location of media in selected areas (e.g. on forest land). Another tool is the local spatial development plan. The role of the plan is to determine the purpose and principles of development of specific areas. It enables the appropriate arrangement of individual purposes in such a way that the housing development is isolated from the functions associated with excessive light emission (e.g. shopping centers, industry). In addition, the local plan may include provisions in the form of recommendations or orders relating to the prevention of light pollution. Their transfer into technical solutions used in privately owned areas is limited, but their educational value and awareness of the authorities of a given commune are important. Records of selected documents of the Capital City of Warsaw were analyzed, including the draft landscape resolution and local spatial development plans. This analysis showed that effective tools to reduce light pollution and its negative effects can be found in the area of spatial planning and development.

**Key words:** light pollution, spatial planning, landscape resolution.

### **Dane kontaktowe autorki:**

**Agnieszka Machnowska**

Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego

Urząd Miasta Stołecznego Warszawy

e-mail: amachnowska@um.warszawa.pl

Grzegorz Iwanicki

## Ocena wykorzystania mediów społecznościowych jako narzędzia promocji obszarów ochrony ciemnego nieba

### Wprowadzenie

Pierwsze obszary ochrony ciemnego nieba zaczęto ustanawiać w bezpośrednim sąsiedztwie obserwatoriów astronomicznych, w celu zminimalizowania wpływu zanieczyszczenia sztucznym światłem na prowadzone w tych obiektach badania naukowe. Część tych działań była pokłosiem opracowanych przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE) i Międzynarodową Unię Astronomiczną (IAU) zaleceń, a także krajowych i lokalnych regulacji prawnych (CIE 1980). Wytyczone w ten sposób obszary stanowiły jedynie strefę buforową wokół infrastruktury badawczej i nigdy, same w sobie, nie były magnesem przyciągającym turystów, w odróżnieniu od leżących w ich centrach obserwatoriów. Przykładami takich stref ochronnych są okolica Obserwatorium Roque de los Muchachos na wyspie La Palma, utworzona decyzją parlamentu Hiszpanii w 1988 roku (BOE 1988) oraz istniejąca od połowy ubiegłego wieku strefa buforowa wokół Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Warszawskiego w Ostrowiku (gmina Celestynów) (Ciemne Niebo 2023)<sup>1</sup>.

Lata 90. XX wieku przyniosły zmianę motywów ustanawiania miejsc ochrony ciemnego nieba, dzięki czemu powstały obszary nastawione głównie na rozwój

---

<sup>1</sup> Działania chroniące nocne niebo w okolicy Obserwatorium przybierały na przestrzeni dekad różne formy. Od 2022 roku trwają starania nad opracowaniem strategii gminy Celestynów i wprowadzeniem stałej ochrony ciemnego nieba w sołectwie Ostrowik. Teren Obserwatorium stał się jednym z certyfikowanych miejsc ochrony ciemnego nieba w ramach Programu Ciemne Niebo – Polska. Więcej o tym na stronie: <https://ciemneniebo.pl/pl/obszary-cn-000/cn-007-ostrowik-czesciowo>.

astroturystyki. Widok gwieździstego nieba zaczęto wykorzystywać jako walor turystyczny i rekreacyjny, a pierwszym tego typu miejscem był utworzony w amerykańskim stanie Michigan park krajobrazowy Lake Hudson Recreation Area, który od 1993 roku prowadzi częściową ochronę ciemnego nieba z myślą o miłośnikach astronomii. Sześć lat później stałą ochroną nocnego nieba objęto Rezerwat Przyrody Torrance Barrens w kanadyjskiej prowincji Ontario. W kolejnych dekadach idea miejsc ochrony naturalnie ciemnego środowiska rozszerzyła się poza Amerykę Północną i obecnie obejmuje ponad 300 parków, rezerwatów i społeczności ciemnego nieba w ponad 30 krajach na świecie (stan na marzec 2023) (DSAG 2023).

Jednym z głównych celów funkcjonowania miejsc ochrony ciemnego nieba, oprócz ochrony nocnego krajobrazu i rozwoju turystyki, jest propagowanie wiedzy o zanieczyszczeniu sztucznym światłem. Aby te działania edukacyjne przynosiły zamierzony skutek, turyści muszą wiedzieć o istnieniu parków, rezerwatów i innych miejsc służyących z ochrony gwieździstego nieba. Zwracano na to uwagę już w pierwszej dekadzie XXI wieku (McMahon 2006). Jednak mimo wieloletniej działalności tych unikatowych atrakcji turystycznych, wiedza o nich nie przebiła się do szerszej świadomości nie tylko turystów, ale także lokalnej społeczności żyjącej w sąsiedztwie tych obszarów, a nawet pracowników okolicznych punktów informacji turystycznej (Iwanicki 2021, 2022).

Celem opracowania jest ocena wykorzystania mediów społecznościowych w promowaniu wiedzy o obszarach ochrony ciemnego nieba, a w szczególności określenie: a) czy wybrane parki, rezerваты i społeczności ciemnego nieba posługują się mediami społecznościowymi w promocji swoich działań, b) w jakim zakresie i w jakich formach wykorzystują tego typu narzędzia, c) ilu potencjalnych odbiorców znajduje się w zasięgu takich działań, oraz d) jaki jest zakres reakcji użytkowników na umieszczane w mediach społecznościowych informacje. Uzasadnieniem podjęcia badania jest założenie, że brak działań promocyjnych w mediach społecznościowych może być jedną z przyczyn niskiej znajomości obszarów ochrony ciemnego nieba w społeczeństwie (a także samej tematyki zanieczyszczenia sztucznym światłem), zwłaszcza wśród młodzieży, dla której media społecznościowe stanowią istotne źródło informacji.

Główną metodą badawczą była analiza treści stron wybranych mediów społecznościowych (Facebook, Instagram, TikTok, YouTube) poświęconych wybranym obszarom ochrony ciemnego nieba. Wybór mediów podyktowany był ich popularnością wśród internautów. Pod uwagę wzięto jedynie media posiadające więcej niż miliard użytkowników (Dixon 2023). Oprócz częstotliwości umieszczanych materiałów, analizie poddane zostały również

dane dotyczące zasięgów stosowanej promocji, w tym liczba osób obserwujących daną stronę, oraz liczba „polubień” i innych interakcji użytkowników przy umieszczanych postach. Zakres czasowy objął głównie okres pierwszej połowy 2023 roku, a w przypadku braku danych także okres wcześniejszy. Dane dla liczby obserwujących dotyczą stanu na 1 lipca 2023 roku.

Zakres przestrzenny badania objął polskie parki ciemnego nieba (PCN): Izerski Park Ciemnego Nieba, Park Gwiazdowego Nieba Bieszczady, Ostoję Ciemnego Nieba Izebno i Chalin, oraz wybrane zagraniczne miejsca: Lake Hudson Recreation Area Dark-Sky Preserve (najstarszy park ciemnego nieba na świecie), Torrance Barrens Dark-Sky Preserve (najstarszy rezerwat ciemnego nieba na świecie), Zselic Starry Sky Park (najstarszy park ciemnego nieba w Europie), Natural Bridge National Monument Dark-Sky Park (najstarszy międzynarodowy park ciemnego nieba certyfikowany przez IDA), Mont-Megantic Dark-Sky Reserve (najstarszy międzynarodowy rezerwat ciemnego nieba certyfikowany przez IDA), a także dodatkowo Alpes Azur Mercantour Dark-Sky Reserve (Francja), Cranborne Chase Dark-Sky Reserve (Anglia), Galloway Forest Dark-Sky Park (Szkocja) i Vrani Kamen Dark-Sky Park (Chorwacja)<sup>2</sup>.

### **Media społecznościowe jako narzędzie informacji turystycznej**

Zarządzanie informacją, zwłaszcza w krajach wysokorozwiniętych, jest jednym z głównych czynników konkurencyjności wśród dostawców usług. Przez wiele dekad na rynku turystycznym głównymi nośnikami informacji o atrakcjach i towarzyszących im usługach były publikacje drukowane w formie przewodników i map turystycznych. Wraz z rozwojem technologii zaczęto w tym celu wykorzystywać również radio i telewizję. Przełomowym ułatwieniem planowania podróży był jednak rozwój internetu, a zwłaszcza portali i mediów społecznościowych (Leung i in. 2013). Rozwój tych technologii stworzył niemal nieograniczone możliwości udostępniania informacji przez usługodawców, podróżnych oraz innych aktorów rynku turystycznego. Media społecznościowe stały się przez to determinantą rozwoju usług turystycznych (Delińska 2018) zwłaszcza, że najbardziej aktywną turystycznie grupą konsumentów są użytkownicy nowych mediów (Kachniewska 2015).

---

<sup>2</sup> Do analizy wybrano wszystkie krajowe parki ciemnego nieba (PCN) oraz, w celach porównawczych, wybrane parki z zagranicy, w tym parki będące przedmiotem badań autora artykułu realizowanych w 2022 roku w ramach grantu NCN MINIATURA 5 pt. „Ocena promocji parków ciemnego nieba w ramach systemów informacji turystycznej na szczeblu regionalnym i lokalnym w Polsce i wybranych krajach Europy” (wniosek nr 2021/05/X/HS4/01021).

Popularność wykorzystywania portali społecznościowych w procesach związanych z podróżą, a zwłaszcza z nabywaniem informacji o kierunkach, związana jest z formą przekazu, która podlega społecznej kontroli (Kaznowski 2014). Treści generowane w tych mediach są upubliczniane nie tylko przez usługodawców, ale także przez końcowych odbiorców tych usług, a więc przez samych turystów (Schivinski i Dąbrowski 2016). Pełnią przez to funkcję komunikacyjno-informacyjną, umożliwiając interakcje między użytkownikami, w tym wymianę doświadczeń, opinii i poglądów (Delińska 2018). Forma zamieszczanych informacji i opinii różni się czasem dość istotnie w zależności od rodzaju danych mediów, które klasyfikowane bywają w różne grupy zależnie od przyjętych kryteriów (Kaplan i Haenlein 2010; Aichner i Jacob 2015).

Kierując się kryterium formy promowania usług i kierunków turystycznych wydzielić można wśród mediów społecznościowych następujące cztery grupy: a) portale społecznościowe polegające na udostępnianiu zdjęć, filmów i opisów do nich, przy jednoczesnej możliwości różnych form reakcji na te treści, w tym komentarzy i innych interakcji (np. Facebook, Instagram, YouTube, Snapchat, TikTok), b) blogi podróżnicze (większość z nich posiada sekcję komentarzy), c) fora dyskusyjne (od lat tracą na znaczeniu), d) serwisy rezerwacyjne i ratingowe (np. Booking.com, TripAdvisor) (Delińska 2018).

Wymienione źródła informacji stanowią istotne czynniki motywu wyboru kierunków, oraz planowania podróży wśród turystów indywidualnych, w tym w ramach *backpackingu* (Patyra i Dłużewska 2015), czy *flashpackingu*, gdy uzupełniane są treściami aplikacji mobilnych (Paris 2012). Wiodąca rola mediów społecznościowych dotyczy szczególnie promocji niszowych kierunków i form turystyki, ze względu na relatywnie większe trudności ze znalezieniem informacji o nich, w porównaniu z miejscami znanymi turystom masowym. Takimi niszowymi atrakcjami są np. parki i rezerваты ochrony ciemnego nieba, wchodzące w skład rozwijającego się w ostatnich latach nurtu turystyki ciemnego nieba (z ang. *dark-sky tourism*) (Iwanicki 2022). Media społecznościowe mogą zwiększyć rozpoznawalność tych miejsc, podobnie jak to się stało z innymi, atrakcjami, nieznanymi dla większości turystów. Działania mogą być podejmowane nie tylko przez oficjalne konta społecznościowe założone przez zarządców danych atrakcji, miast, regionów, czy całych kierunków, ale również przez konta influencerów, którzy nierzadko są zatrudniani w ramach kampanii promocyjnych. Przykładem takich działań był projekt #VisitPoland finansowany przez Ministerstwo Sportu i Turystyki oraz Polską Organizację Turystyczną w 2021 roku, w ramach którego wykorzystano tzw. *influencer marketing*,

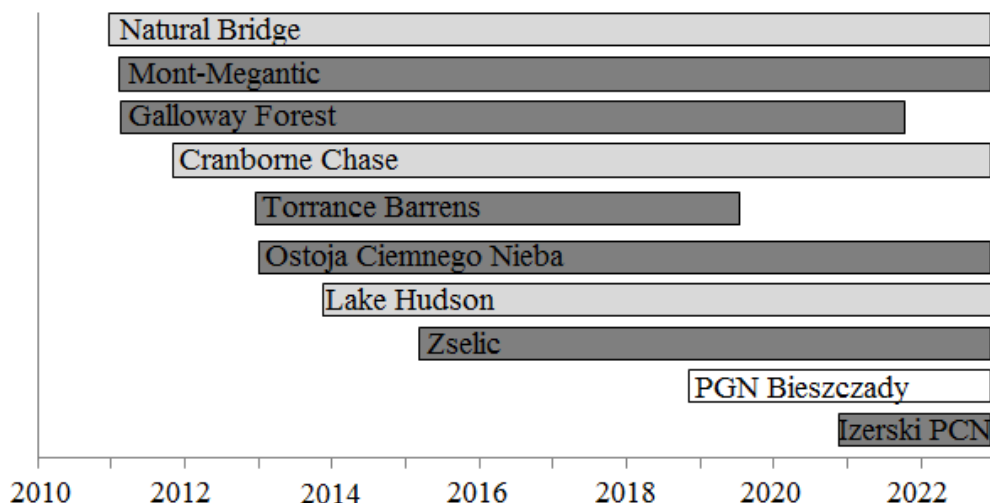
angażując zagranicznych rozpoznawalnych twórców wysokozasięgowych mediów społecznościowych (POT 2022).

## **Wyniki**

Najpopularniejszym medium społecznościowym stosowanym przez analizowane obszary był Facebook. Jedynie park Vrani Kamen oraz rezerwat Alpes Azur Mercantour nie posiadały konta w tym serwisie. Na oficjalnych stronach internetowych dwóch kolejnych obszarów, Izerskiego PCN oraz rezerwatu Torrance Barrens, ikony odsyłające do serwisu kierowały na konta tylko częściowo związane z ich działalnością, odpowiednio na *Astro Izery*, oraz *Guardians of the Dark Sky*. Pierwsze z tych kont funkcjonuje od 2015 roku i obserwowane jest przez około 2100 użytkowników. Mimo posiadania znacznych zasięgów, potencjał konta nie jest ostatnio wykorzystywany. Przez pierwsze sześć miesięcy 2023 roku pojawił się na nim tylko jeden post, na który zareagowało jedynie kilka osób (2 polubienia i 5 komentarzy). Z analizy treści wcześniejszych postów wynika, że jest to konto obserwowane głównie przez osoby zainteresowane astronomią, a tym astrofotografią. Drugie z wymienionych kont przestało być aktywne w 2019 roku po 12 miesiącach funkcjonowania. W tym okresie osiągnęło liczbę 101 obserwujących.

Pozostałe konta są pośrednio lub bezpośrednio związane z nazwą badanych parków i rezerwatów, przy czym można je podzielić na trzy grupy. Pierwszą stanowią oficjalne konta parków narodowych lub krajobrazowych, obejmujących ten sam teren, co utworzone tam obszary ochrony ciemnego nieba (Lake Hudson Recreation Area, Natural Bridge National Monument, Cranborne Chase). Ze względu na mnogość rozwijanych i promowanych tam form turystyki i rekreacji, treści dotyczące astroturystyki i zanieczyszczenia światłem stanowią tylko niewielką część ogółu umieszczanych tam postów (tylko takie treści były włączane do analizy). Drugą grupę stanowią konta funkcjonujące głównie w celu umożliwienia wirtualnego „zameldowania się” w danym miejscu (parki w Bieszczadach i Izerach). Treści na tych kontach stanowią wyłącznie prywatne posty (głównie zdjęcia) udostępniane tam przez turystów, którzy w relacjach z podróży „udostępniają” miejsce pobytu. Polubienia, komentarze i inne interakcje związane z umieszczanymi postami należą do czynności wykonywanych jedynie przez użytkowników będących znajomymi autorów tych postów, przy czym twórcy tego typu kont nie biorą bezpośredniego udziału w kreowaniu zawartości. Ostatnią grupę stanowią właściwe konta, poświęcone poszczególnym obszarom ochrony ciemnego nieba (parki Izerski, Zselic i Galloway Forest, a także Ostoja Ciemnego Nieba oraz rezerwaty Torrance Barrens i Mont-Megantic).

Spośród ostatniej z wyszczególnionych grup najdłuższą historię mają konta utworzone przez park Galloway Forest i rezerwat Mont-Megantic, które zaczęły korzystać z możliwości Facebooka pod koniec 2010 roku (ryc. 1). Najkrócej zaś funkcjonuje konto poświęcone Izerskiemu parkowi (od listopada 2020 roku, przy czym wspomniane *Astro Izery* od 2015). Uwzględniając transgraniczny charakter parku i jego czeską stronę, działalność astroturystyczna w Izerach relacjonowana jest na Facebooku od połowy 2011 roku, za pośrednictwem konta *Jizerska oblast tmave oblohy*.

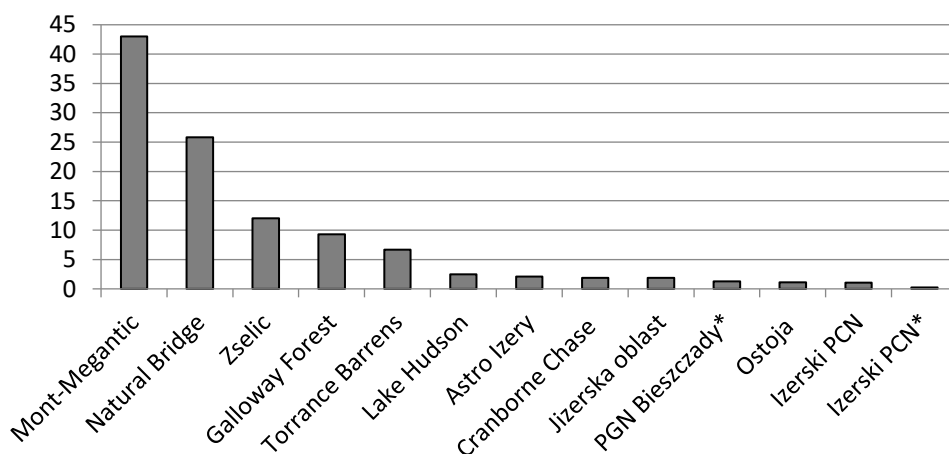


Ryc. 1. Okres funkcjonowania analizowanych kont serwisu Facebook.

Notka: kolorem ciemnoszarym zaznaczono konta utworzone wyłącznie w celach promocji parków i rezerwatów ciemnego nieba, jasnoszarym konta parków narodowych lub krajobrazowych, na terenie których utworzono miejsca ochrony ciemnego nieba, a białym konto służące głównie jako miejsce udostępniania swojego pobytu podczas podróży (dla czytelności wykresu nie zaznaczono na nim podobnego, nieoficjalnego konta parku w Izerach – konto to funkcjonuje od 2014 roku).

Konta pozostałych obszarów utworzone były w roku 2012 roku (Torrance Barrens i Ostoja Ciemnego Nieba), oraz 2015 (park Zselic). Przy węgierskim parku warto wspomnieć, że mimo jego międzynarodowego charakteru, konto prowadzone jest wyłącznie w języku lokalnym. Dotyczy to również nazwy strony (*Zselici Csillagpark*), która dla osób nieznających węgierskiego może być trudna do rozpoznania. Podobny aspekt językowy dotyczy funkcjonowania konta Międzynarodowego Rezerwatu Ciemnego Nieba Mont-Megantic, które prowadzone jest w języku francuskim. Dodatkowo poświęcone jest ono nie tylko utworzonemu tam rezerwatowi, ale także miejscowemu parkowi narodowemu, co znajduje odzwierciedlenie w nazwie konta: *ASTROLab. Parc national. Réserve internationale du Mont-Mégantic*.

Z wyjątkiem kont poświęconych rezerwatowi Torrance Barrens (aktywność ustała w lipcu 2019 roku), parkowi Galloway Forest (konto aktywne do września 2021 roku), oraz Ostoi Ciemnego Nieba (ostatni post zamieszczony w grudniu 2022 roku), wszystkie analizowane strony Facebooka kontynuowały swoją działalność w 2023 roku, przy czym pod względem uzyskanej liczby obserwujących użytkowników zdecydowanie wiodącym było konto rezerwatu Mont-Megantic (43 tys. obserwujących). Kolejne pozycje zajęły strony Natural Bridge National Monument (25,8 tys.) oraz parku Zselic (12 tys.). Pozostałe konta posiadały znacznie mniejsze zasięgi, a najmniej obserwujących miało nieoficjalne konto Izerskiego Parku (245 obserwujących). Kilkakrotnie więcej miało oficjalne konto. Obserwowane było przez 1057 użytkowników, co stanowiło podobny wynik jak w przypadku Ostoi Ciemnego Nieba (1,1 tys.) oraz parku w Bieszczadach (1,3 tys.) (ryc. 2).



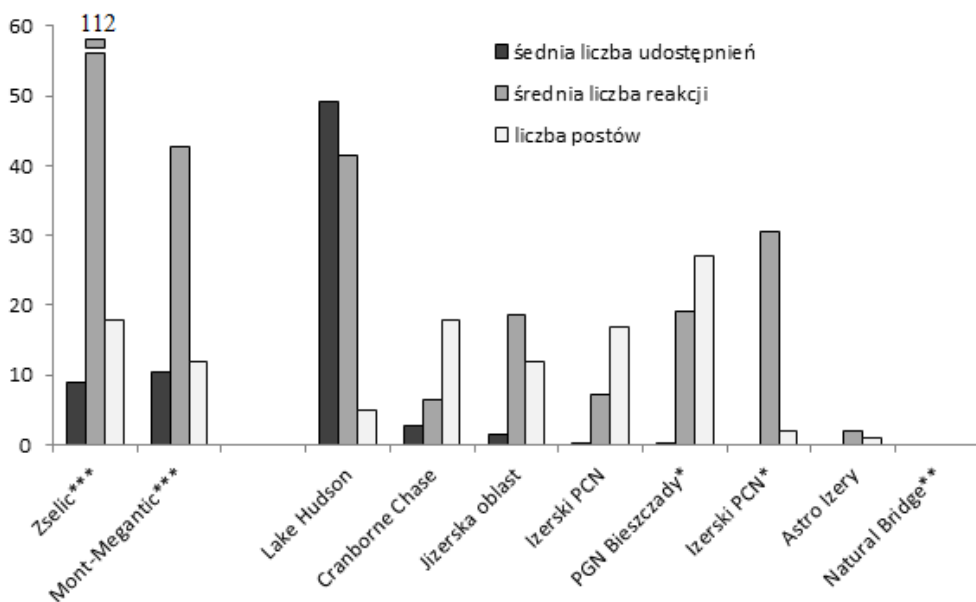
Ryc. 2. Liczba obserwujących analizowane konta na Facebooku (w tysiącach) (oznaczenie \* pokazuje konta służące głównie jako miejsca „zameldowań”).

Liczba obserwujących ma potencjalne znaczenie w przyszłych działaniach promocyjnych, natomiast aktualną aktywność danego konta można zmierzyć m.in. sumując liczbę umieszczanych postów i towarzyszące im reakcje użytkowników. W tym zakresie analizowane obszary można podzielić na cztery grupy pod względem ich aktywności na Facebooku (według danych dla pierwszego półrocza 2023 roku): a) konta bardzo aktywne (kilkanaście postów miesięcznie, wraz z dużą liczbą interakcji użytkowników), b) konta o umiarkowanej aktywności (maksymalnie kilka postów miesięcznie, lub w skali roku), c) konta o sporadycznej aktywności, d) konta nieaktywne w 2023 roku.



Do pierwszej z wymienionych grup należą strony parku Zselic oraz rezerwatu Mont-Megantic, które tylko w czerwcu 2023 roku zamieściły odpowiednio 18 i 12 postów o tematyce astronomii, astroturystyki i zanieczyszczenia światłem. Zaprezentowane informacje cieszyły się zainteresowaniem internautów i średnio 10 użytkowników przekazywało je dalej (funkcja udostępnienia na swoim profilu), przy czym średnia liczba reakcji („polubień” itp.) wyniosła 112 dla parku Zselic i 44 dla rezerwatu Mont-Megantic (ryc. 3).

Skromniejsze statystyki towarzyszyły pozostałym obszarom, z których na wyróżnienie zasługuje park Lake Hudson. Mimo publikacji jedynie 5 postów w pierwszym półroczu 2023 roku, cieszyły się one sporym zainteresowaniem użytkowników (wzięto pod uwagę jedynie posty związane z ciemnym niebem i astroturystyką). Udostępniono je średnio 49 razy, przy średniej 41 reakcji na każdy post. Z pewnością miało to związek z publikacją informacji o organizacji pierwszego w historii parku wydarzenia o charakterze astroturystycznym *First Dark Sky Event*. Zbiegło się ono z celebracją 30-lecia ustanowienia ochrony ciemnego nieba na tym terenie. We wcześniejszych latach posty związane z tematyką ciemnego nieba były na tym koncie nieliczne i ograniczone głównie do wzmianek o rojach meteorów.



Ryc. 3. Liczba postów i interakcji w serwisie Facebook w pierwszym półroczu 2023 roku (oznaczenia: \* konta służące do „zameldowań”; \*\* konto Natural Bridge National Monument, było aktywne w 2023 roku, jednak nie zamieszczono na nim żadnych postów o tematyce związanej z astronomią, astroturystyką czy ochroną ciemnego nieba; \*\*\* dane tylko dla czerwca 2023 roku).

Z polskich parków najbardziej aktywne konto należało do Izerskiego PCN, który pod względem liczby postów przewyższył profil poświęcony czeskiej części parku (odpowiednio 17 i 12 postów). Treści umieszczane przez południowych sąsiadów spotykały się jednak z większą interakcją użytkowników. Pozostałe konta polskich obszarów odznaczały się mniejszą aktywnością, przy czym strona Ostoi Ciemnego Nieba nie umieściła żadnego postu w badanym okresie. Odrębnie należy spojrzeć na aktywność nieoficjalnych stron Izerskiego PCN oraz PGN Bieszczady, ponieważ umieszczana zawartość ograniczała się do automatycznego udostępniania zdjęć publikowanych przez osoby „meldujące się” tam podczas swoich podróży.

Pozostałe media społecznościowe stanowiły marginalny kanał promocji i przekazu informacji. Jedynie rezerwy Mont-Megantic oraz Cranborne Chase posiadały konta na Instagramie oraz YouTube, jednak były na nich zdecydowanie mniej aktywne, niż na Facebooku. Żaden z badanych obszarów nie miał za to konta na TikToku.

Istniejący od 2019 roku instagramowy profil kanadyjskiego rezerwatu zebrał 2,1 tys. użytkowników, jednak ostatnią treść umieszczono tam w połowie minionego roku. Podobnie niewielkie znaczenie promocyjne miało konto na YouTube, posiadające 226 subskrybentów. Założone zostało w 2009 roku, a niektóre publikowane tam w przeszłości filmy, w tym o tematyce ciemnego nieba, osiągały tysiące wyświetleń. W 2023 roku umieszczono na nim jedynie 4 krótkie materiały filmowe, wszystkie o tematyce zaćmień Słońca. Obejrzało je od kilkudziesięciu do ponad 600 osób.

Instagramowe konto rezerwatu Cranborne Chase, obserwowane przez 1,6 tys. użytkowników, funkcjonuje od 2017 roku. W 2023 umieszczono na nim tylko jeden post nawiązujący do problematyki ciemnego nieba, który uzyskał 37 „polubień”. Z kolei konto rezerwatu na serwisie YouTube utworzono dość późno, bo dopiero w 2020 roku. Uzyskało 59 subskrybentów i umieszczono na nim w analizowanym okresie jeden krótki film, wyświetlony przez 250 użytkowników. Tematyka nawiązywała do prowadzonej na terenie rezerwatu ochrony ciemnego nieba, przy okazji celebrowania Międzynarodowego Tygodnia Ciemnego Nieba (*International Dark Sky Week*). Warto dodać, że angielski rezerwat był jedynym z grona badanych obszarów, który miał utworzone także konto na Twitterze. Odnośniki do wszystkich używanych przez Cranborne Chase mediów społecznościowych można było także znaleźć na jego oficjalnej stronie internetowej.

## Dyskusja i podsumowanie

Media społecznościowe otworzyły nowe możliwości w relacjach między usługodawcami a konsumentami. Dotyczy to także podmiotów rynku turystycznego, które dzięki narzędziom dostępnym użytkownikom Facebooka, Instagrama i innych sieci społecznościowych, mogą rozwijać się bez konieczności inwestowania w drogie kampanie reklamowe w tradycyjnych mediach. W dodatku umieszczane treści mogą być za darmo przekazywane większej grupie odbiorców za pośrednictwem użytkowników obserwujących dane profile. Stwarza to możliwości niemal nieograniczonego udostępniania informacji, co jest kluczowe zwłaszcza dla kierunków czy atrakcji turystycznych mniej znanych masowym turystom.

Wyniki badania wskazują, że potencjał Facebooka, który w 2009 roku stał się najpopularniejszym medium społecznościowym na świecie, został dostrzeżony przez zarządców niektórych obszarów ochrony ciemnego nieba. Już w latach 2010–2013 utworzono konta dla 6 z badanych obszarów, a w kolejnych latach dla pozostałych. Wydaje się jednak, że tylko na kontach parku Zselic i rezerwatu Mont-Magantic liczba umieszczanych informacji i ich zakres pozwalają wykorzystać możliwości, jakie niosą ze sobą tzw. nowe media. Przekłada się to na liczbę obserwujących, a więc i na zasięg działań promocyjnych, ponieważ jedynie ciekawe i aktualne posty mogą zapewnić zainteresowanie ze strony użytkowników.

Pozostałe media społecznościowe, mimo prób ich częściowego wykorzystania ze strony rezerwatów Cranborne Chase i Mont-Megantic, nie odegrały większej roli w promocji działań z zakresu ochrony ciemnego nieba. W przypadku serwisu YouTube może się to wydać zrozumiałe, ponieważ produkcja wysokiej jakości materiałów filmowych jest kosztochłonna i czasochłonna w porównaniu do umieszczania postów np. na Facebooku. Nie tłumaczy to jednak niemal całkowitego braku zainteresowania dotarciem do grup odbiorców używających Instagrama i TikToka. Zwłaszcza, że te dwa media skierowane są do młodszych grup docelowych niż odbiorcy Facebooka.

Brak pełnego wykorzystywania narzędzi oferowanych przez media społecznościowe wynikać może z różnych przyczyn. Pierwszą, najbardziej oczywistą, jest brak personelu oddelegowanego do wykonywania działań promocyjnych za pośrednictwem wspomnianych mediów. Częstym powodem jest brak środków na takie działania. Dotyczy to zwłaszcza obszarów, które zostały powołane wysiłkiem pasjonatów, zaangażowanych w dużej mierze na zasadach wolontariatu w działania z zakresu ochrony ciemnego nieba. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt funkcjonowania obszarów ciemnego nieba

w obrębie kilku lub wielu jednostek organizacyjnych, jak w przypadku polskich parków, a także parku Vrani Kamen i rezerwatu Alpes Azur Mercantour.

W lepszej sytuacji są obszary ustanowione na terenie wyłącznie jednego, funkcjonującego już wcześniej parku narodowego lub krajobrazowego, jak wyróżniające się aktywnością w mediach społecznościowych rezerwaty Cranborne Chase i Mont-Megantic (wiodąca rola tamtejszego parku narodowego), czy park Zselic. W przypadku dwóch ostatnich, pomaga także działalność obserwatoriów astronomicznych, które są centrami edukacyjno-turystycznymi z zatrudnionym tam personelem. Organizacja wydarzeń towarzyszących codziennej działalności takich obiektów w naturalny sposób dostarcza materiałów dla różnych relacji i postów, a budżet przeznaczony na funkcjonowanie danych obszarów, w tym na wynagrodzenia dla pracowników zaangażowanych w działania promocyjne, jest podstawą sprawnie działającego konta społecznościowego.

Kolejnym utrudnieniem wpływającym na ograniczone działania w sferze promocyjnej, jest brak posiadania osobowości prawnej przez część badanych obszarów, a co za tym idzie brak stałych środków finansowych na wynagrodzenia dla personelu. Problem ten wydaje się mało realny do rozwiązania w najbliższej przyszłości, zwłaszcza w perspektywie parków ciemnego nieba działających w Polsce. Będą one nadal funkcjonować w dużej mierze dzięki energii i zaangażowaniu inicjatorów tych projektów. Może się to jednak okazać niewystarczające do propagowania wiedzy o tych obszarach poza grupami osób zainteresowanych astronomią, a wyjście poza ten krąg odbiorców jest jednym z głównych warunków rozprzestrzeniania na większą skalę świadomości o skutkach zanieczyszczenia sztucznym światłem.

Wyniki zaprezentowanej analizy należy traktować jako wstępne badanie dotyczące aktywności w mediach społecznościowych jedynie wybranych obszarów ochrony ciemnego nieba. Ten ograniczony zakres przestrzenny, wraz z brakiem badań na temat źródeł zdobywania wiedzy o poszczególnych parkach i rezerwatach ciemnego nieba, wpływają na ogólnikowy charakter wysuniętych w niniejszym artykule wniosków. Mimo ograniczeń zastosowanej metody, otrzymane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań z zakresu wpływu promocji obszarów ciemnego nieba na zwiększanie społecznej świadomości negatywnych skutków zjawiska zanieczyszczenia sztucznym światłem.

## Literatura

- Aichner T., Jacob F., 2015. Measuring the Degree of Corporate Social Media Use. *International Journal of Market Research* 57(2): 257–275.
- BOE, 1988. Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias. *Boletín Oficial de Estado* 264.
- CIE, 1980. Guidelines for minimalizing urban sky glow near astronomical observatories, *Technical Report No. 1*, Commission Internationale de l'Éclairage,
- Ciemne Niebo, 2023. *Obszary CN-000. Program Ciemne Niebo-Polska*. <https://ciemneniebo.pl/pl/obszary-cn-000> (dostęp: 27.06.2023).
- Dixon S., 2023. Global social networks ranked by number of users 2023. *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networks-ranked-by-number-of-users/> (dostęp: 27.06.2023).
- Delińska L., 2018. Media społecznościowe jako determinanta rozwoju usług turystycznych, *Ekonomiczne Problemy Usług* 1(130): 17–25.
- DSAG, 2023. *World list of dark sky places* (updated 1st March 2023), IUCN Dark Skies Advisory Group. [http://darksleeparks.org/dsag/2021-02-28\\_DSAG\\_word\\_list.htm](http://darksleeparks.org/dsag/2021-02-28_DSAG_word_list.htm) (dostęp: 20.06.2023).
- Iwanicki G., 2021. Are dark-sky parks recognisable in society? The example of Izera Dark-Sky Park. [in:] Ścieżor T. (ed.), *Ecological and astronomical aspects of light pollution*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków: 133–142.
- Iwanicki G., 2022. Astro-tourism in the Czech–Polish Izera Dark Sky Park. [in:] Novelli M., Cheer J.M., Dolezal C., Jones A., Milano C. (eds.), *Handbook of Niche Tourism*. Research Handbooks in Tourism series, Edward Elgar: 2–13.
- Kachniewska M., 2015. Potencjał mediów społecznościowych w obszarze popularyzacji aktywności turystycznej. *Rozprawy Naukowe Akademii Wychowania Fizycznego we Wrocławiu* 50: 35–48.
- Kaplan A.M., Haenlein M., 2010. Users of the World, Unite! The Challenges and Opportunities of Social Media. *Business Horizons* 53(1): 59–68.
- Kaznowski D., 2014. Social media – społeczny wymiar Internetu. [w:] Królewski J. (red.), *E-Marketing. Współczesne trendy. Pakiet startowy*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa: 69–91.
- McMahon P., 2006. Wilderness stargazing. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 100(2): 75.
- Leung D., Law R., Hoof H., Buhalis D., 2013. Social Media in Tourism and Hospitality: A Literature Review. *Journal of Travel & Tourism Marketing* 30(1–2): 3–22.
- Paris C.M., 2012. Flashpacking: A Discussion of Independent Travel in a Digital World. *Information and Communication Technologies in Tourism*: 25–27: 191–202.
- Patyra A., Dłużewska A., 2015. Backpacking – historia, ramy, rozwój. *Turystyka Kulturowa* 11: 40–54.
- POT, 2022. *Sprawozdanie z działalności Polskiej Organizacji Turystycznej w 2021 roku*, POT.
- Schivinski B., Dąbrowski D., 2016. The Effect of Social Media Communication on Consumer Perceptions of Brands. *Journal of Marketing Communications* 22(2): 189–214.

## **Streszczenie**

Głównym celem rozdziału jest przedstawienie wyników oceny wykorzystania mediów społecznościowych w promocji wybranych obszarów ochrony ciemnego nieba. Celem szczegółowym było określenie, czy badane obszary posługują się mediami społecznościowymi w promocji swoich działań, a jeśli tak, to w jakim zakresie i w jakich formach wykorzystują tego typu narzędzia. Motywem podjęcia tej problematyki była niska świadomość społeczna odnośnie istnienia parków, rezerwatów i innych miejsc ochrony nocnego krajobrazu, a także ogólnej tematyki zanieczyszczenia sztucznym światłem. Główną metodą badawczą była analiza treści stron wybranych mediów społecznościowych (Facebook, Instagram, TikTok, YouTube) prowadzonych przez wybrane obszary ochrony ciemnego nieba. Oprócz częstotliwości umieszczanych materiałów, analizie poddane zostały również dane dotyczące zasięgów stosowanej promocji (liczba osób obserwujących daną stronę, liczba „polubień” i innych reakcji użytkowników przy umieszczanych postach). Wyniki badania wskazują, że tylko część badanych obszarów wykorzystuje ten typ promocji i posiada własną stronę w mediach społecznościowych. Brak działań w tym zakresie może być jedną z przyczyn niskiej znajomości obszarów ochrony ciemnego nieba w społeczeństwie, zwłaszcza wśród młodzieży, dla której media społecznościowe stanowią istotne źródło informacji.

**Słowa kluczowe:** ochrona ciemnego nieba, parki ciemnego nieba, media społecznościowe, promocja w turystyce, astroturystyka.

## **The assessment of using social media as a tool for promoting dark-sky protected areas**

### **Summary**

The main purpose of the chapter is to present the results of an assessment of the use of social media in the promotion of selected dark-sky protected areas. The specific goal was to determine whether the studied areas use social media in the promotion of their activities, and if so, to what extent and in what forms they use such tools. The motivation for addressing this issue was the low public awareness of the existence of parks, reserves and other dark-sky protected sites, as well as the general topic of artificial light pollution. The main research method was content analysis of social media accounts (Facebook, Instagram, TikTok, YouTube) run by selected dark-sky protected areas. In addition to the frequency of posted materials, data on the number of followers, "likes" and other user interactions on the posts were analyzed. The results of the survey indicate that only some of the surveyed areas use social media as a tool of their promotion. The lack of activity in this area may be one of the reasons for the low awareness of dark-sky places in society, especially among young people, for whom social media are important source of information.

**Key words:** dark-sky preserve, dark-sky parks, social media, tourism promotion, astro-tourism.

### **Dane kontaktowe autora:**

**Grzegorz Iwanicki**

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Instytut Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej

e-mail: grzegorz.iwanicki@mail.umcs.pl

Piotr Nawalkowski

## Light Pollution Think Tank

### Wprowadzenie

Chcąc opisać i wyjaśnić znaczenie powołanego pierwszego w Polsce Light Pollution Think Tank (LPTT) musimy najpierw przywołać dwa pojęcia: *light pollution* oraz *think tank*. Pierwsze z nich jest anglojęzycznym terminem odnoszącym się do zanieczyszczenia sztucznym światłem. To sytuacja, w której organizm w niewłaściwym czasie czy miejscu ekspozowany jest na działanie światła o zbyt dużym natężeniu lub niewłaściwym widmie spektralnym (kolorze)<sup>1</sup>. Nadmiar wytworzonego przez człowieka światła w porze nocnej jest rozpraszany przez obecne w atmosferze gazy i aerozole itp., odbijany od powierzchni podłoża, warstwy gęstych chmur czy cząstek stanowiących zanieczyszczenie powietrza. W ostatnich latach dodatkowo to nadmierne oświetlenie zmienia się, wraz z postępem technologicznym i większą dostępnością urządzeń, z „cieplej” pomarańczowej, na „zimną” niebiesko-białą. Skażenie światłem negatywnie wpływa na ludzkie zdrowie i stan środowiska naturalnego. Think tanki natomiast to działające od dziesięcioleci w krajach anglosaskich organizacje eksperckie, których nazwę można przetłumaczyć na język polski dosłownie jako „zbiornik myśli” albo „myślący czołg”, i pojęcie czołgu nie jest tu użyte przypadkowo. Szczyt rozwoju tych organizacji przypadał na okres II wojny światowej, podczas której eksperci i stratedzy wojskowi pracowali nad najlepszymi koncepcjami dla amerykańskiej armii, w schronach lub specjalnych pomieszczeniach. Po wojnie ich rola ewoluowała, od działalności

---

<sup>1</sup> Zobacz: „Po ciemnej stronie światła”, A. Kotarba, *Teraz Środowisko* (rep. 02 sierpnia 2017): <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/po-ciemnej-stronie-swiatla-3618.html> (dostęp: 30.06.2023).



na rzecz bezpieczeństwa, ku tematom społeczno-gospodarczym (Ziętara 2009). Dzisiaj są to zazwyczaj interdyscyplinarne zespoły związane przede wszystkim z nauką, które, jak przyjęło się obrazowo mówić, nierzadko, wręcz dosłownie, „strzelają pomysłami”. Think tanki tworzone są przez uczelnie, grupy naukowców lub specjalistów, a ich celem jest poszukiwanie sposobów rozwiązywania problemów społecznych, wspieranie organów rządowych, samorządowych, głównie poprzez poradę ekspercką, poprzedzoną badaniami lub dyskusją.

Zgodnie z definicją przywoływaną przez Ziętare (2009), ważnym i pożądanym elementem charakteryzującym think tanki jest niezależność od rządu i wszelkich wpływów społecznych, w tym grup interesów czy partii politycznych. Niezależność think tanków przejawia się w pełnej wolności, ale przy zachowaniu warsztatu naukowego, aktualnych metod prowadzenia badań i dokonywania analiz. Niezależność ta oznacza również, że żaden podmiot zewnętrzny nie będzie wpływał na prowadzone badania nawet w sytuacji, kiedy jest on ich zleceniodawcą. W przeciwnej sytuacji zostałaby naruszona istota funkcjonowania tych organizacji eksperckich.

W przypadku krajowego Light Pollution Think Tank zrezygnowano z powoływania osobnego bytu prawnego, tworząc niezależną „ekspertką grupę roboczą” wspieraną formą prawną Stowarzyszenia POLARIS-OPP. W tym przypadku stowarzyszenie użycza swojej osobowości w przypadku aplikowania o dotacje, współtworzy i pełni jednocześnie oficjalną rolę jego administratora. Przykładów zastosowania takiej konstrukcji prawnej można w Polsce odnaleźć znacznie więcej.

W badaniu ankietowym na zlecenie Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego, przeprowadzonym w 2020 roku przez Biuro Badań Społecznych Question Mark, analizie poddano 46 z 52 organizacji, będących beneficjentami Priorytetu 4 Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich (PROO) na lata 2018–2030. Priorytet 4 to „rozwój instytucjonalny think tanków obywatelskich”, skierowany do tych organizacji, które zgodnie z definicją opracowują badania, analizy i opinie związane ze sprawami krajowymi lub międzynarodowymi, w celu merytorycznego wspierania procesów podejmowania strategicznych decyzji lub przyjmowania rozwiązań i regulacji.

Badanie wykazało, iż do specyficznych barier rozwoju tego rodzaju organizacji należy niewystarczający poziom zainteresowania wiedzą przez nie dostarczaną oraz niedostateczne rozpoznanie i uznanie ich roli, jako podmiotów

mogących wpływać na politykę<sup>2</sup>. Według autorów tym samym nie są one w stanie w pełni realizować jednej ze swoich najważniejszych funkcji, jaką jest dostarczanie decydom obiektywnych danych, niezbędnych do podejmowania działań w myśl idei polityki opartej na dowodach (ang. *evidence-based policy*)<sup>3</sup>. Wyniki raportu jednoznacznie wskazują, iż organizacje-beneficjenci PROO 4 z lat 2019–2020 stanowią zróżnicowaną grupę pod względem stażu działalności. Największą z nich stanowią organizacje w fazie „młodości”, tj. o stażu poniżej 5 lat (19 spośród 52 organizacji). Objęte badaniem organizacje w zdecydowanej większości mają siedzibę w wielkich miastach. Co trzeci przedstawiciel organizacji zadeklarował, że należy ona do porozumień organizacji pozarządowych, co piąty – że posiada status Organizacji Pożytku Publicznego (OPP), co szósty – że realizuje zadanie publiczne. Organizacje poddane ankietyzacji najczęściej prowadzą działania w obszarze edukacji i wychowania oraz w zakresie realizacji badań naukowych (zadeklarowała to ponad połowa organizacji), a także wsparcia NGO (organizacja pozarządowa, ang. *non-government organization*) i inicjatyw obywatelskich oraz tworzenia przepisów, praw człowieka i działalności politycznej. Niemal 2/3 organizacji zmieniło obszar swojej działalności, biorąc pod uwagę czas, jaki minął od momentu ich powstania, przy czym połowa organizacji określa te zmiany jako nieznaczne. Polegały one najczęściej na podejmowaniu nowych działań w ramach dotychczasowych obszarów działalności oraz rozszerzeniu działalności organizacji o nowe obszary, rzadko na rezygnacji z określonego obszaru aktywności. Wśród podejmowanych nowych obszarów były przede wszystkim: działalność badawcza, analityczna i ewaluacyjna, wspieranie rozwiązywania różnorodnych aktualnych problemów społecznych, a także wspieranie NGO i inicjatyw społecznych. Duży wpływ na kierunki rozwoju organizacji miała współpraca z innymi organizacjami, instytucjami czy ekspertami, stanowiąca impuls do nowych aktywności. W kanon ten wpisuje się także działalność Stowarzyszenia POLARIS-OPP, które najpierw inicjując temat w 2009 roku, a później podejmując się roli administratora think tanku (2022), nieznacznie zmieniło i dostosowało swoją działalność – z pierwotnej, czysto pasjonackiej na badawczo-rozwojową i ekspercką.

---

<sup>2</sup> Narodowy Instytut Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego. *Rządowy Program Rozwoju Organizacji Obywatelskich na lata 2018–2030 PROO*. Tekst ujednolicony. Warszawa 2018.

<sup>3</sup> Raport z badania pt. *Analiza beneficjentów priorytetu 4 Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich na lata 2018–2030*. Biuro Badań Społecznych Question Mark na zlecenie Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego.

Innym aspektem działalności think tanków jest komunikacja społeczna. Ich przedstawiciele biorą często udział w debatach, rozmowach i dyskusjach publicznych. Starają się też wyjaśniać specyfikę zjawisk czy procesów, które zachodzą w społeczeństwie. W ten sposób stają się konstruktywnymi krytykami działań organów władzy. Przez to obecni są regularnie w różnych mediach. Ich wypowiedzi można wysłuchać w programach telewizyjnych, radiowych czy znaleźć w internecie<sup>4</sup>. Jak pokazuje cytowany raport, w przypadku organizacji objętych dofinansowaniem w 2020 roku, wyraźnie zaznacza się zmiana stylu komunikacji i współpracy. Co czwarty respondent wskazuje na wzrost znaczenia opinii ekspertów w działaniach i komunikacji organizacji. Rok wcześniej blisko połowa badanych wskazywała na zmiany wynikające z opracowania nowej strategii komunikacji z odbiorcami zewnętrznymi na potrzeby realizacji zadań w PROO 4, która miała przełożenie również na komunikację wewnętrzną. To uzasadnia potrzebę szczególnej uwagi na proces komunikowania – tak zewnętrznego, jak i wewnętrznego think tanków.

### **Geneza powstania Light Pollution Think Tank**

Zalążkiem utworzenia pierwszego krajowego Light Pollution Think Tank były wieloletnie działania popularyzatorskie, spotkania podczas konferencji naukowych i wspólna debata ze środowiskiem naukowców i nauczycieli akademickich, z aktywistami, działaczami i praktykami, starającymi się przeciwdziałać nasilającemu się zjawisku zanieczyszczenia sztucznym światłem.

Kluczowe w tym przypadku były dwa wydarzenia. Pierwszym z nich była cykliczna, organizowana już od 2013 roku Ogólnopolska Konferencja nt. Zanieczyszczenia Światłem (OKZŚ). Konferencja ta umożliwiła spotkanie naukowców i aktywistów, którzy problemem zanieczyszczeniem światłem (ZŚ) chcieli się aktywnie zajmować. Jednym z efektów organizacyjnych OKZŚ było zawiązanie stałego, interdyscyplinarnego komitetu naukowego OKZŚ. Drugim ważnym wydarzeniem było powstanie w 2019 roku, w ramach projektu „Dark Sky Poland”, pierwszego multidyscyplinarnego zespołu eksperckiego. Projekt realizowało Stowarzyszenie POLARIS-OPP (administrator Programu Ciemne Niebo – Polska). Zadaniem tego zespołu było przeszkolenie i przygotowanie piątki działaczy regionalnych do aktywnego podejmowania inicjatyw społecznych na rzecz ochrony ciemnego nieba w różnych obszarach kraju.

---

<sup>4</sup> Zobacz: „Specyfika think tanków”, M. Krzeszowska, <https://zpe.gov.pl/b/specyfika-think-tankow/PV6I0G088> (dostęp: 30.06.2023).

Późniejsze, wielogodzinne dyskusje, spotkania i inicjatywy podejmowane przez stałych ekspertów i ekspertki OKZŚ, zaowocowały wypracowaniem idei, a następnie pierwszego wniosku o dofinansowanie działalności opisywanego think tanku. Stało się to głównie za sprawą zaangażowania działaczy Programu Ciemne Niebo Stowarzyszenia POLARIS-OPP, którzy w 2022 roku pozyskali środki z Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego (NIW-CRSO) z Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich PROO 4 (ryc. 1).



SFINANSOWANO ZE ŚRODKÓW NARODOWEGO INSTYTUTU WOLNOŚCI – CENTRUM  
ROZWOJU SPOŁECZEŃSTWA OBYWATELSKIEGO W RAMACH RZĄDOWEGO PROGRAMU  
ROZWOJU ORGANIZACJI OBYWATELSKICH NA LATA 2018–2030 PROO

Ryc. 1. Wizualizacja obowiązkowych znaków graficznych Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich PROO4 (NIW-CRSO).

Przyznane środki finansowe pozwoliły od lipca 2022 roku podjąć szereg działań (w terminie do grudnia 2023 roku), mających być odpowiedzialnością na zdiagnozowane przez grupę inicjatywną następujące problemy:

- niska świadomość społeczna istnienia zanieczyszczenia światłem,
- brak podstaw prawnych kształtowania i prowadzenia polityki oświetlenia zewnętrznego,
- konieczność skuteczniejszej identyfikacji problemu zanieczyszczenia światłem,
- niewystarczająca implementacja wyników badań naukowych do życia codziennego w ramach zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego,
- konieczność wzmocnienia efektywności działań i promocji miejsc, gdzie świadomie podejmowane są trafne rozwiązania techniczne i/lub społeczne, aby przeciwdziałać negatywnym konsekwencjom zjawiska (<https://ciemneniebo.pl/pl/przyklady-oswietlen>),
- potrzeba wzmocnienia oddziaływania wydarzeń o charakterze ogólnokrajowym, jak OKZŚ ([www.noc.edu.pl](http://www.noc.edu.pl)),
- zbyt mała dostępność do urzędzeń i metod pomiarowych zanieczyszczenia światłem,
- brak kompleksowej oceny stanu zanieczyszczenia światłem w Polsce.

## Skład osobowy Light Pollution Think Tank

Aktualnie w ramach Light Pollution Think Tank aktywnie działają następujące osoby (wymienione w kolejności alfabetycznej), reprezentujące krajowe środowisko naukowe, administrację publiczną oraz organizacje pozarządowe:

- dr Grzegorz Iwanicki – adiunkt badawczo-dydaktyczny w Katedrze Geografii Społeczno-Ekonomicznej Instytutu Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Autor kilkudziesięciu publikacji z zakresu geografii turystyki i rozwoju zrównoważonego; problematyką ZŚ i turystyki astronomicznej zajmuje się od ponad dekady;
- mgr inż. Dominika Karpińska – doktorantka Interdyscyplinarnej Szkoły Doktorskiej Academia Copernicana UMK w Toruniu, która realizuje w Katedrze Geomatyki i Kartografii Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej rozprawę doktorską dotyczącą „Zanieczyszczenie światłem nocnego nieba w Toruniu”. Autorka kilkunastu publikacji naukowych w zakresie ZŚ oraz inicjatorka i wykonawczyni miejskiej sieci monitoringu nocnego nieba w Toruniu. Zainteresowania naukowe związane są z geoinformatyką, teledetekcją satelitarną, ochroną środowiska oraz analizą danych;
- dr Sylwester Kołomański – astronom pracujący w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu Wrocławskiego. W obszarze jego zainteresowań naukowych znajdują się następujące tematy: heliofizyka, czyli badanie zjawisk będących przejawami aktywności Słońca, takich jak rozbłyski i erupcje obserwowane w zakresie promieniowania EUV i X oraz zanieczyszczenie światłem, a w szczególności jego wpływem na astronomię. Pomysłodawca i realizator wielu projektów i działań związanych z edukacją, popularyzacją i badaniem problematyki zanieczyszczenia światłem, np. Izerski Park Ciemnego Nieba, edukacyjny projekt Wygasz i sieć stacji monitorujących ALPS (Allsky Light Pollution Survey);
- dr inż. Anna Kołton, prof. URK – pracownik naukowy w Katedrze Botaniki, Fizjologii i Ochrony Roślin Wydziału Biotechnologii i Ogrodnictwa Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie. Główne zainteresowania naukowe to fotobiologia roślin, w tym wykorzystanie światła i lamp LED do poprawy jakości plonu roślin ogrodniczych oraz reakcje roślin na stres zanieczyszczenia światłem w nocy; fizjologia reakcji roślin na czynniki stresowe, a w szczególności odpowiedź systemu antyoksydacyjnego, wpływ warunków miejskich na funkcjonowanie drzew i krzewów, reakcje na warunki hipoksji w obrębie systemu korzeniowego, a także metabolizm azotowy roślin i możliwości jego

regulacji. Od kilku lat zajmuje się upowszechnianiem wiedzy dotyczącej wpływu zanieczyszczenia światłem na rośliny;

- dr hab. Andrzej Kotarba – adiunkt w Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Geograf fizyczny, klimatolog, specjalizujący się w problematyce satelitarnych obserwacji Ziemi, w tym w szczególności klimatologii satelitarnej (zachmurzenie, pokrywa śnieżna). W realizowanych badaniach podejmuje także temat satelitarnych obserwacji antropogenicznej emisji światła („nocnych światel Ziemi”), bazując na danych z radiometrów satelitów meteorologicznych oraz cyfrowej fotografii z Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Prowadzi stację fotometrycznych pomiarów jasności nieba nad Warszawą. Popularyzator tematyki związanej z eksploracją kosmiczną, w tym zagadnień satelitarnego monitoringu środowiska Ziemi i innych planet;
- dr hab. Mieczysław Kunz, prof. UMK – kierownik Katedry Geomatyki i Kartografii na Wydziale Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu; prowadzi badania naukowe w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku; specjalizacja – geoinformacja i teledetekcja środowiska, specjalista II stopnia TRIZ. Zainteresowania badawcze dotyczą głównie systemów informacji przestrzennej, teledetekcji lotniczej i satelitarnej, monitoringu środowiska przyrodniczego (w tym ZŚ) oraz kartowania sozologicznego. Przewodniczący Oddziału Teledetekcji Polskiego Towarzystwa Geograficznego oraz Dyrektor Programowy Toruńskiego Festiwalu Nauki i Sztuki; edukator i popularyzator w zakresie technologii geoprzestrzennych. Autor licznych publikacji naukowych, map oraz atlasów internetowych i interaktywnych baz wiedzy, oprogramowania do prowadzenia konsultacji przestrzennych, a także inicjator i wykonawca miejskiej sieci monitoringu nocnego nieba w Toruniu;
- mgr Agnieszka Machnowska – architektka krajobrazu, urbanistka, magister nauk społecznych w specjalności administracja rządowa i samorządowa. Od 16 lat związana z samorządem warszawskim. Obecnie zaangażowana w prace nad nowym studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Warszawy, w którym prowadzi prace analityczne i planistyczne w zakresie środowiska i błękitno-zielonej infrastruktury. Zajmuje się również zanieczyszczeniem światłem i jego wpływem na środowisko zurbanizowane; prowadzi działania edukacyjne w tym zakresie; członkini Stowarzyszenia POLARIS-OPP;
- mgr Piotr Nawalkowski – prezes Zarządu Stowarzyszenia POLARIS-OPP i koordynator Programu Ciemne Niebo – Polska; redaktor naczelny portalu [www.ciemnieniebo.pl](http://www.ciemnieniebo.pl); współautor pierwszego w Polsce obszaru czynnej ochrony ciemnego nieba na terenie gminy Jeleśnia, aktualnie główny koordynator polsko-norwesko-słoweńskiego projektu „Racjonalna polityka

oświetleniowa w praktyce" (Fundusz EOG) w ujęciu strategii Smart Village dla miejscowości Sopotnia Wielka; zawodowo zajmuje się komunikacją społeczną (MBA-NGO), fundraiser, ekspert III sektora (Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej, Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego, Narodowej Agencji Europejskiego Korpusu Solidarności i Erasmus+, „Działaj Lokalnie” Akademii Rozwoju Filantropii w Polsce, Polsko-Amerykańskiej Fundacji Wolności i inne);

- mgr inż. Karolina Skorb – ornitolożka i doktorantka Instytutu Systematyki i Ewolucji Zwierząt Polskiej Akademii Nauk. Głównie zainteresowania badawcze dotyczą wpływu zanieczyszczenia światłem oraz temperatury otoczenia na ptaki. Prezeska Górnośląskiego Koła Ornitologicznego;
- prof. dr hab. Krystyna Skwarło-Sońta – emerytowana profesor Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego; specjalność fizjologia zwierząt, chronobiologia (zwłaszcza szyszynka i melatonina), neurohormonalna regulacja odporności. Redaktor naczelna najstarszego w Polsce popularno-naukowego kwartalnika KOSMOS, propagującego problemy nauk biologicznych. Zajmuje się wpływem zanieczyszczenia światłem na funkcjonowanie endogenego zegara biologicznego ludzi i zwierząt; członkini Stowarzyszenia POLARIS-OPP;
- dr Katarzyna Szlachetko – adiunkt w Katedrze Prawa Administracyjnego Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Gdańskiego; prowadzi badania nad prawnymi i administracyjnymi aspektami przeciwdziałania ZŚ w ramach autorskiego projektu „Good Light Law” przy Instytucie Metropolitalnym w Gdańsku;
- dr hab. Tomasz Ścieżor – adiunkt w Katedrze Wodociągów, Kanalizacji i Monitoringu Środowiska Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej; specjalizuje się w badaniach wpływu sztucznego oświetlenia nocnego na środowisko naturalne i realizacji pomiarów zanieczyszczenia światłem, zarówno w strefach zurbanizowanych jak i na obszarach chronionych;
- dr inż. Przemysław Tabaka – adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej; członek Prezydium Polskiego Komitetu Oświetleniowego SEP, rzeczoznawca Stowarzyszenia Elektryków Polskich w dziale Technika Świetlna, ekspert Stowarzyszenia Elektryków Polskich, członek Komisji Kwalifikacyjnej (przy SEP Oddział Łódzki) do stwierdzania wymagań kwalifikacyjnych osób zajmujących się eksploatacją i dozorem urządzeń, instalacji i sieci energetycznych. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień szeroko pojętej techniki świetlnej.

W pracach zespołu uczestniczą także inne osoby współpracujące doraźnie bądź wspierające swoją wiedzą i doświadczeniem LPTT.

### **Dotychczasowa działalność Light Pollution Think Tank**

Od lipca 2022 roku wśród podjętych działań przez LPTT można wymienić szereg aktywności. Jedną z inauguracyjnych była niewielka kampania marketingowa, poprzedzona ogłoszeniem konkursu na projekt logo i księgę identyfikacji wizualizacji (KIW), które pozwolą na późniejszą jednoznaczną identyfikację działalności grupy i tematyki, którą się zajmuje. Opracowano regulamin<sup>5</sup>, na podstawie którego można było zgłaszać swoje propozycje graficzne wraz z krótkim uzasadnieniem, a jury składające się z zespołu eksperckiego LPTT przeanalizowało ponad 60 nadesłanych w formie elektronicznej prac zaproponowanych przez 40 autorów. Decyzją jury, jako zwycięski projekt graficzny wybrano propozycję przygotowaną przez Piotra Felszyńskiego (ryc. 2). Autor inspirował się kulą ziemską oraz żarówką, a wybrana propozycja została umieszczona na okładce głównego poradnika LPTT.



Ryc. 2. Logo Light Pollution Think Tank w wersji barwnej w układzie poziomym (autor projektu graficznego: Piotr Felszyński).

Równocześnie rozpoczęto rozeznanie rynku i prace graficzne nad opracowaniem jednolitego projektu wielkoformatowego billboardu, którego ekspozycja miała miejsce jeszcze w 2022 roku (ryc. 3). W tym celu przygotowanych zostało również kilka autorskich wersji, z których ostatecznie wybrano jeden, autorstwa członkini LPTT, Karoliny Skorb (rysunek przedstawiający wpływ nadmiernej ekspozycji na światło z wizerunkiem chłopaka, rośliny i sójki)<sup>6</sup>.

Na podstawie zaleceń i uwag gremium LPTT została opracowana kampania na nośnikach billboardowych: opracowano grafikę i jej kluczowy przekaz oraz

---

<sup>5</sup> <https://noc.edu.pl/logo/>.

<sup>6</sup> <https://ciemnieniebo.pl/pl/dzialania-w-polsce/359-kampania-billboardowa-i-konkurs>.



po przekazaniu przez agencję listy miejsc z dostępnymi billboardami, wytypowano lokalizacje o dużym natężeniu ruchu (miejsca uczęszczane przez pieszych, wolnego i bardzo wolnego ruchu kołowego).



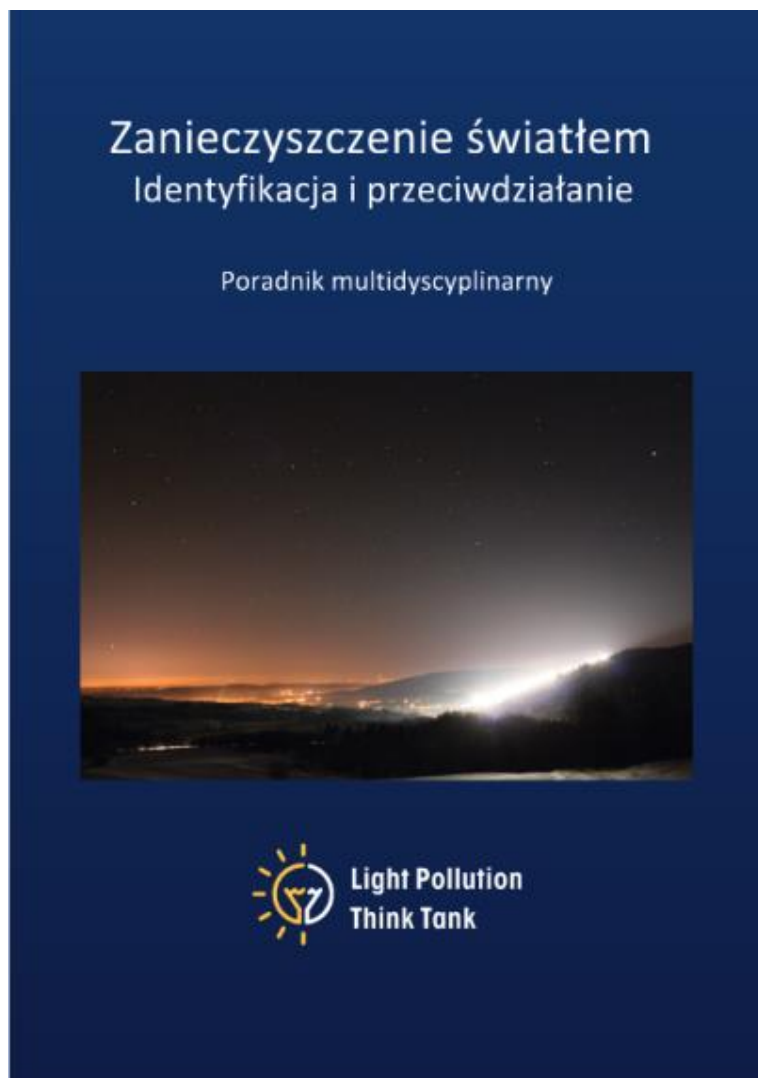
Ryc. 3. Billboard przygotowany przez LPTT w ramach kampanii informacyjnej na rzecz zwiększenia świadomości społecznej zjawiska zanieczyszczenia światłem. Billboard pojawił się w kilku dużych polskich miastach (autorka: Karolina Skorb).

Bilbordy pojawiły się pod koniec 2022 roku w 8 dużych miastach – Chorzowie, Koszalinie, Lublinie, Łodzi, Poznaniu, Toruniu, Warszawie i Wrocławiu. Zgodnie z danymi przekazanymi przez agencję marketingową mierzącą oglądalność takich reklam, przekaz potencjalnie trafił do ponad 160 tys. osób, czego efektem było zwiększone zainteresowanie mediów, niektórych samorządów, a przede wszystkim samych mieszkańców. Zwracali się oni do administratora think tanku (Stowarzyszenie POLARIS-OPP) najczęściej z prośbami o poradę, w jaki sposób zmniejszyć uciążliwość sztucznego światła z sąsiedztwa albo gdzie można zasięgnąć dodatkowych informacji o tematyce ochrony ciemnego nieba. Zespół LPTT wystosował m.in. listy otwarte do instytucji rządowych i samorządowych w zakresie polityki oświetleniowej, planowanych modernizacji w sferze miejskiego oświetlenia itp. Przeprowadzono kilkanaście otwartych prelekcji online dotyczących zagrożeń i konsekwencji zbyt dużego rozsyłu światła w porze nocnej. Część z nich jest dostępna w mediach społecznościowych czy na kanale YouTube Stowarzyszenia POLARIS-OPP<sup>7</sup>.

Trzynastoosobowy zespół ekspercki opracował i przygotował do wydania multidyscyplinarny poradnik dotyczący problemu zanieczyszczenia światłem (ryc. 4). Licząca 28 stron publikacja wydana została pod tytułem „Zanieczyszczenie

<sup>7</sup> [http://www.youtube.com/channel/UCDmH8cKWAlk\\_wfx1W-WPfqQ?feature=watch](http://www.youtube.com/channel/UCDmH8cKWAlk_wfx1W-WPfqQ?feature=watch).

światłem. Identyfikacja i przeciwdziałanie. Poradnik multidyscyplinarny”. Przed końcem 2022 roku broszurę wydano i rozpoczęto nieodpłatny proces jej dystrybucji, zarówno w wersji papierowej, jak i cyfrowej<sup>8</sup>. W 2023 roku zaplanowany został jej szerszy kolportaż.



Ryc. 4. Okładka poradnika multidyscyplinarnego „Zanieczyszczenie światłem. Identyfikacja i przeciwdziałanie” wydanego w 2022 roku, jako efekt kilkumiesięcznej działalności LPTT.

Wśród istotnych elementów standaryzacji działań było przyjęcie przez zarząd Stowarzyszenia POLARIS-OPP uchwały o obowiązkowej konsultacji

---

<sup>8</sup> Pełną wersję poradnika w formacie *pdf* można nieodpłatnie pobrać ze strony <https://poradniklptt.gr8.com/> lub za pośrednictwem odnośnika z [www.ciemnieniebo.pl](http://www.ciemnieniebo.pl).

z zespołem think tanku kolejnych certyfikacji (opiniowania) tzw. obszarów ochrony ciemnego nieba, ewidencjonowanych od 2005 roku w ramach Programu Ciemne Niebo – Polska. Ich celem jest objęcie zgłaszanych lokalizacji (dzielnic, miejscowości lub innych obszarów) umowną ochroną przed nadmiernym oświetleniem oraz ewidencjonowanie podjętych już inicjatyw służących zachowaniu naturalnej ciemności nocy. Zgodnie z założeniami przedsięwzięcia, think tank skupił się nad rozpatrzeniem wniosku jednego z obszarów, który spełniał przesłanki zgodności z wytycznymi Programu Ciemne Niebo – Polska<sup>9</sup>. Miejszem tym okazała się lokalizacja w sołectwie Ostrowik w gminie Celestynów, gdzie znajduje się jedno z najstarszych obserwatoriów astronomicznych w Polsce, należące do Uniwersytetu Warszawskiego. Od kilku lat prowadzone są tam czynne starania dla zachowania naturalnej ciemności nocy i redukcji światła zewnętrznego. Zespół think tanku spotykał się trzykrotnie, aby rozważyć zebrane dokumenty oraz linki we wniosku o nadanie numeru CN-007. Koordynację działań w tym obszarze zgłosiła Monika Sitek, kierowniczka Pracowni Naukowo-Popularyzatorskiej Obserwatorium w Ostrowiku. Odbyło się również wirtualne spotkanie dyskusyjne z ekspertami i opinią publiczną tzw. *meetingów z teleskopami* Stowarzyszenie POLARIS-OPP<sup>10</sup>, z którego zapis nagrania w programie Zoom dostępny jest publicznie<sup>11</sup>. Uczestnicy tego spotkania debatowali nad sposobami czynnej ochrony w tym miejscu ciemnego nocnego nieba, aby nadal umożliwiała prowadzenie tam zarówno badań naukowych jak i popularyzacji astronomii wśród społeczeństwa. Opis i lokalizacja wraz z dodatkowymi linkami wskazującymi na aktywność i świadome działania w kierunku redukcji zanieczyszczenia sztucznym światłem dostępne są na stronie Programu Ciemne Niebo – Polska<sup>12</sup>.

W końcu 2022 roku rozpoczęto prace nad raportem dotyczącym stanu zanieczyszczenia światłem w Polsce. Zadanie to traktowane jest jako kluczowe działanie o charakterze misyjnym. Opierając się o dane z posiadanych już stacji pomiarowych ALPS (<http://alps.astro.uni.wroc.pl/>), oraz z mobilnych punktów Pracowni Pomiarów Zanieczyszczenia Światłem Politechniki Krakowskiej czy Katedry Geomatyki i Kartografii Wydziału Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu oraz bazy danych innych zespołów badawczych w Polsce, LPTT sporządzi jeden, ogólny raport traktujący o stanie zanieczyszczenia światłem w naszym kraju. Zostanie on

---

<sup>9</sup> <https://ciemneniebo.pl/pl/archiwum/360-rodzaje-ochrony-ciemnego-nieba-lub-ich-brak>.

<sup>10</sup> <https://polaris.org.pl/dzialy-tematyczne/dzial-obszerwacyjny/587-pierwszy-teleskop>.

<sup>11</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=QIp4rW2bhCc>.

<sup>12</sup> <https://ciemneniebo.pl/pl/obszary-cn-000/cn-007-ostrowik-czesciowo>.

uzupełniony o mapy z serwerów [lightpollution.info](http://lightpollution.info) z opracowania Jurji Stare ze Słowenii, jednego z członków międzynarodowego panelu eksperckiego (polsko-norwesko-słoweńskiego) w innym projekcie dotacyjnym, zainicjowanym i koordynowanym również przez Stowarzyszenie POLARIS-OPP.

Wspomniany projekt pt. „Racjonalna polityka oświetleniowa w praktyce” finansowany jest przez Islandię, Liechtenstein i Norwegię z Funduszy EOG w ramach Programu Aktywni Obywatele – Fundusz Regionalny. W podstawowych założeniach raport zespołu LPTT będzie zawierał opis stanu pomiarów jasności nocnego nieba prowadzonych w Polsce oraz metadane opisujące te pomiary. Przeprowadzona będzie przestrzenno-czasowa analiza satelitarnych pomiarów emisji sztucznego światła. Wyznaczone zostaną wskaźniki obciążenia ekosystemu przez zanieczyszczenie światłem oraz zbadany stan prawny w tym zakresie w Polsce. Dodatkowo, jeśli uda się zgromadzić odpowiednie dane, określona zostanie skala wykorzystania źródeł typu LED w oświetleniu publicznym (takie źródła mogą się przyczynić do znaczącego wzrostu zanieczyszczenia światłem).

Zgodnie z założeniami, prace nad audytem, a dokładniej raportem na temat stanu zanieczyszczenia sztucznym światłem w Polsce, rozpoczęły się już na początku IV kwartału 2022 roku. Ukonstytuowano zespół roboczy, któremu przewodniczy Andrzej Kotarba z CBK PAN w Warszawie. W skład tego zespołu zadaniowego weszły także inne osoby zajmujące się badaniami zanieczyszczenia światłem, tj. Mieczysław Kunz i Dominika Karpińska z UMK w Toruniu, a także Sylwester Kołomański z UW (koordynator sieci ALPS) oraz Tomasz Ścieżor z PK. Częścią techniczną, a także doбором niektórych urządzeń pomiarowych zajęł się Przemysław Tabaka z UŁ. Zespół zadaniowy spotykał się kilkakrotnie w formule on-line analizując i przyjmując szablon raportu wraz z jego objętością i metodami pomiarowymi. Wykonano szereg badań w obszarach tzw. czynnej ochrony ciemnego nieba, takich jak Izerski Park Ciemnego Nieba, w okolicach Torunia i jego otuliny oraz innych newralgicznych miejscach nadmiernej emisji światła sztucznego, np. w sąsiedztwie szklarni w miejscowości Stężycza pod Lublinem. Bazowano przy tym także na pracy wolontariuszy i naukowców pracujących m.in. w otoczeniu szklarni w Siechnicach. W dostarczeniu wyników z tych dwóch ostatnich lokalizacji znaczący wkład mieli odpowiednio Grzegorz Iwanicki z UMCS w Lublinie oraz Karolina Skorb z ISEZ PAN. Pomiary w Toruniu w ramach założonej sieci monitoringu ZŚ, i w Borach Tucholskich, jako obszarze chronionym, prowadzi zespół UMK pod kierownictwem Mieczysława Kunza.

Osoby te dostarczyły raporty wzorujące się na formularzach EKO-005 działu ekologicznego Stowarzyszenia POLARIS-OPP<sup>13</sup>.

Kolejnym, ważnym zadaniem, jakie wyznaczył sobie think tank już na samym początku realizacji opisywanego przedsięwzięcia rozwojowego, była implementacja rozwiązań LPTT do przestrzeni publicznej. Pomimo, że zgodnie z harmonogramem implementacja ta miała nastąpić dopiero w 2023 roku (z uwagi na konieczność proporcjonalnej konstrukcji budżetu na oba lata realizacji przedsięwzięcia finansowanego z NIW-CRSO), to jednak już w 2022 roku dokonano zakupu prostych w obsłudze urządzeń do samodzielnego pomiaru zanieczyszczenia światłem. Były to fotometry: ręczne urządzenie SQM w wersji L kanadyjskiej firmy Unihedron, a także europejskie urządzenia pomiarowe TESS oraz TAS z Hiszpanii. Łącznie pięć tego typu sensorów było do dyspozycji już w połowie września 2022 roku i dosyć szybko pojawiło się zainteresowanie ich nieodpłatnym użyczeniem (głównie ze strony środowisk akademickich i szkolnych). Dokumentami potwierdzającymi to zainteresowanie są protokoły użyczeń oraz raporty pomiarowe wykonane przy ich użyciu.

Drugim poddziałaniem z tego zadania implementacyjnego, przeprowadzonym także w 2022 roku, było opracowanie scenariuszy zajęć edukacyjnych, nazwanych roboczo LP-kitami. To wielotematyczne zestawy edukacyjne zawierające akcesoria i karty pracy, umożliwiające zgłębienie tematyki zanieczyszczenia światłem od strony astronomii, biologii roślin i zwierząt, zdrowia człowieka, techniki świetlnej, urbanistyki, astroturystyki i inicjatyw społecznych. Zestawy oferują użytkownikom zadania o różnym poziomie trudności, poszerzając w ten sposób krąg potencjalnych odbiorców. W zamyśle były to propozycje samodzielnie wykonywanych zadań, zapoznających osoby zainteresowane z tematyką ZŚ: jego obecnością i skutkami, obserwowanymi na różnych poziomach życia i działalności człowieka. Łącznie opracowano 9 takich scenariuszy w oparciu o standaryzowany raport (kartę pracy), a docelowo think tank zaakceptował 8 z nich, które zostały przeznaczone do przygotowania pudełkowej wersji pakietów, wydanych w drugiej połowie 2023 roku. Będzie je można nieodpłatnie wypożyczyć za pośrednictwem administratora think tanku. Zawartość zestawów wraz z opisem możliwości wykorzystania została szczegółowo opisana w innym rozdziale niniejszej monografii, zatytułowanym „Edukacja przez eksperyment i zabawy badawcze – przykład zestawów edukacyjnych”.

---

<sup>13</sup> Zobacz: [https://polaris.home.pl/pub/LPTT/raport\\_eko-005-pl-aktywny.pdf](https://polaris.home.pl/pub/LPTT/raport_eko-005-pl-aktywny.pdf).

Light Pollution Think Tank wraz z Uniwersytetem Mikołaja Kopernika w Toruniu, przy współpracy z Programem Ciemne Niebo – Polska, podjął się organizacji VII Ogólnopolskiej Konferencji na temat Zanieczyszczenia Światłem<sup>14</sup>. Konferencja odbędzie się w terminie 14–15 września 2023 roku, jako wydarzenie towarzyszące toruńskiej części obrad Światowego Kongresu Kopernikańskiego. Głównym celem konferencji jest prezentacja aktualnego stanu wiedzy i wymiana doświadczeń w zakresie zanieczyszczenia środowiska sztucznym światłem oraz dyskusja nad działaniami służącymi redukcji intensywności tego zagrożenia. Konferencja będzie miała jak zwykle charakter interdyscyplinarny. Będzie to także doskonała okazja do prezentacji efektów ponadrocznej pracy think tanku i do dyskusji nad jego przyszłością.

## Podsumowanie

Planowany zakres działań wykracza poza opisane, już rozpoczęte, realizacje. Ponieważ problematyka jest znacznie bardziej obszerna, konieczne jest poszerzenie zakresu działalności think tanku, jak chociażby proponowanie zmian prawa w zakresie skuteczniejszego, systemowego przeciwdziałania zanieczyszczeniu światłem. Wyraz temu dali m.in. współautorzy dokumentu pt. „Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego”<sup>15</sup>, wydane pod redakcją Szlachetko (2022), wskazując na brak prawnej regulacji tej formy zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Do rozważenia pozostają także inne opcje, jak chociażby współpraca z biznesem branży oświetleniowej czy spójna certyfikacja opraw oświetleniowych, minimalizujących zjawisko zanieczyszczenia światłem.

W zakresie ograniczania zanieczyszczenia światłem i zrównoważonego oświetlenia zewnętrznego nadal jest dużo do zrobienia w naszym kraju. Dlatego LPTT jest również otwarty na udział nowych osób zainteresowanych współpracą, a doświadczenie wnosi nie jedna organizacja, lecz wiele instytucji i podmiotów, za którymi stoją eksperci i ekspertki różnych dziedzin. Osoby deklarujące zaangażowanie w prace LPTT prowadzą także bardzo często nieformalne akcje edukacyjne wśród uczniów szkół podstawowych i ponadpodstawowych oraz pracowników samorządowych.

Biuro projektu rozwojowego Light Pollution Think Tank mieści się obecnie pod adresem Stowarzyszenia POLARIS-OPP w Sopotni Wielkiej 174, która to miejscowość ubiega się od kilku lat o status *International Dark Sky Community* (IDA), jako pierwsza tego typu społeczność w Polsce. Oficjalnymi stronami

---

<sup>14</sup> Zobacz: <https://noc.edu.pl/okzs2023/>.

<sup>15</sup> [www.goodlightlaw.im.edu.pl/memorandum](http://www.goodlightlaw.im.edu.pl/memorandum); zobacz też *Urania* 3-4/2022: 76–77.

internetowymi są obecnie *noc.edu.pl* oraz *ciemnieniebo.pl*, a także obowiązkowa wizytówka przedsięwzięcia *www.polaris.org.pl*<sup>16</sup>.

## Literatura

- Krzeszowska M., *Specyfika think tanków*. Zintegrowana Platforma Edukacyjna (<https://zpe.gov.pl/b/specyfika-think-tankow/PV6IOG088>).
- Po ciemnej stronie światła*. Teraz Środowisko, 2017. (<https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/po-ciemnej-stronie-swiatla-3618.html>).
- Rządowy Program Rozwoju Organizacji Obywatelskich na lata 2018–2030*, 2018. PROO Narodowy Instytut Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego. Tekst ujednolicony, Warszawa.
- Raport z badania „Analiza beneficjentów priorytetu 4 Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich na lata 2018-2030”*, 2021. Biuro Badań Społecznych Question Mark na zlecenie Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego, Warszawa.
- Szlachetko K. (red.), 2022. *Memorandum w sprawie ustanowienia prawnych podstaw zrównoważonej polityki oświetlenia zewnętrznego*. Instytut Metropolitalny, Gdańsk, 48 s.
- Zanieczyszczenie światłem. Identyfikacja i przeciwdziałanie*. Poradnik Multidyscyplinarny, 2022. Light Pollution Think Tank, Stowarzyszenie POLARIS-OPP.
- Ziętara W., 2009. Istota think tanks. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin – Polonia XVI* (1).

## Netografia

- <https://noc.edu.pl/logo/> (dostęp: 30.06.2023).
- <https://ciemnieniebo.pl/pl/dzialania-w-polsce/359-kampania-billboardowa-i-konkurs> (dostęp: 30.06.2023).
- [http://www.youtube.com/channel/UCDmH8cKWAlk\\_wfx1W-WPfqQ?feature=watch](http://www.youtube.com/channel/UCDmH8cKWAlk_wfx1W-WPfqQ?feature=watch) (dostęp: 30.06.2023).
- <https://ciemnieniebo.pl/pl/archiwum/360-rodzaje-ochrony-ciemnego-nieba-lub-ich-brak> (dostęp: 30.06.2023).
- <https://polaris.org.pl/dzialy-tematyczne/dzial-obszerwacyjny/587-pierwszy-teleskop> (dostęp: 30.06.2023).
- <https://noc.edu.pl/okzs2023/> (dostęp: 30.06.2023).
- <https://www.polaris.org.pl/projekty/syg-brorsen-w-realizacji> (dostęp: 30.06.2023).

---

<sup>16</sup> [www.polaris.org.pl/projekty/syg-brorsen-w-realizacji](https://www.polaris.org.pl/projekty/syg-brorsen-w-realizacji).

## Streszczenie

Pod definicją think tanku kryją się działające od dziesięcioleci w krajach anglosaskich organizacje eksperckie, których nazwę można przetłumaczyć na język polski dosłownie jako „zbiornik myśli” czy „myślący czołg”. To zazwyczaj interdyscyplinarne zespoły związane ze środowiskiem naukowym. Tworzone są przez uczelnie, grupy naukowców lub specjalistów, a ich celem jest poszukiwanie sposobów rozwiązania problemów społecznych, wspieranie organów rządowych, samorządowych itd., poprzez poradę ekspercką, poprzedzoną badaniami lub dyskusją. Założeniem utworzenia takiego zespołu zajmującego się tematyką zanieczyszczenia sztucznym światłem były wieloletnie działania popularyzatorskie, spotkania w czasie konferencji naukowych i wspólny dyskurs ze środowiskiem naukowców i nauczycieli akademickich z aktywistami, działaczami i praktykami starającymi się przeciwdziałać nasilającemu się w naszym kraju zjawisku „light pollution”. Kluczowe w tym przypadku były dwa wydarzenia: okresowo współorganizowana, Ogólnopolska Konferencja na temat Zanieczyszczenia Światłem (OKZŚ) oraz powstanie w 2019 roku pierwszego, multidyscyplinarnego zespołu na potrzeby projektu „Dark Sky Poland”, zainicjowanego przez Stowarzyszenie POLARIS-OPP (administratora Programu Ciemne Niebo – Polska), gdzie zadaniem grupy eksperckiej było przeszkolenie i przygotowanie piątki działaczy regionalnych do aktywnego podejmowania inicjatyw społecznych na rzecz tzw. ochrony ciemnego nieba w różnych obszarach kraju. Późniejsze, wielogodzinne dyskusje, spotkania i inicjatywy podejmowane przez stałych ekspertów i ekspertki OKZŚ, zaowocowały wypracowaniem idei, a następnie pierwszego wniosku o dofinansowanie działalności opisywanego think tanku, zajmującego się zanieczyszczeniem światłem. Stało się to właśnie za sprawą zaangażowania działaczy Programu Ciemne Niebo – Polska Stowarzyszenia POLARIS-OPP, gdzie środki pozyskane z Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego (Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich PROO 4), pozwolą w okresie od lipca 2022 roku do grudnia 2023 roku podjąć szereg działań mających być odpowiedzią na zdiagnozowane przez grupę problemy. Polski, Light Pollution Think Tank – czy to tylko forum wymiany myśli, czy jednak coś więcej?

**Słowa kluczowe:** think tank, LPTT, POLARIS-OPP, zanieczyszczenie światłem.



## **Light Pollution Think Tank**

### **Summary**

The definition of a think tank covers expert organizations operating for decades in Anglo-Saxon countries, whose name can be translated literally into Polish as "thought tank" or "thinking tank". These are usually interdisciplinary teams related to science. They are created by universities, groups of scientists or specialists, and their goal is to search for ways to solve social problems, support government and local government bodies, etc., through expert advice, preceded by research or discussion. The origins of the creation of such a team dealing with the subject of artificial light pollution were many years of popularizing activities, meetings during scientific conferences and a joint discourse with the environment of scientists and academic teachers with activists, activists and practitioners trying to counteract the phenomenon of "light pollution" which is growing in our country. Two events were crucial in this case: the periodically co-organized National Conference on Light Pollution and the formation of the first multidisciplinary team for the "Dark Sky Poland" project in 2019, initiated by the POLARIS-OPP Association (administrator of the Dark Sky Poland Program), where the task of the expert group was to train and prepare five regional activists to actively undertake social initiatives for the so-called dark sky protection in different areas of the country. Later, many hours of discussions, meetings and initiatives undertaken by permanent experts and experts of OKZŚ resulted in the development of an idea, and then the first application for funding the activity of the described think tank, dealing with light pollution. This was due to the involvement of the activists of the Dark Sky Program of the POLARIS Association-OPP, where the funds obtained from the National Institute of Freedom – Center for the Development of Civil Society (Programme for the Development of Civic Organizations PROO 4) will allow for the period from July 2022. by December 2023, take a number of actions to respond to the problems diagnosed by the group. Polish, Light Pollution Think Tank – is it just a forum for exchanging thoughts or something more?

**Key words:** think tank, LPTT, POLARIS-OPP, light pollution.

### **Dane kontaktowe autora:**

**Piotr Nawalkowski**  
Stowarzyszenie POLARIS-OPP  
Program Ciemne Niebo – Polska  
e-mail: ciemnieniebo@op.pl

**Anna Kołton, Grzegorz Iwanicki, Sylwester Kołomański,  
Agnieszka Machnowska, Piotr Nawalkowski, Karolina Skorb,  
Krystyna Skwarło-Sońta, Przemysław Tabaka**

## **Edukacja przez eksperyment i zabawy badawcze – przykład zestawów edukacyjnych**

### **Wprowadzenie**

Związek człowieka z przyrodą jest podkreślany w wielu utworach literackich czy malarstwie. Autorzy tych dzieł zwracają uwagę na piękno natury oraz rozbudzają zachwyt i szacunek dla niej. Takie dzieła stanowią początek edukacji ekologicznej, która w Polsce realizowana jest systematycznie w szkołach podstawowych i średnich (Kalinowska 2020). Prowadzenie edukacji ekologicznej jest elementem niezbędnym i wymaganym przez instytucje międzynarodowe (UE, ONZ i inne) w celu wprowadzania zrównoważonego rozwoju. Jednak zdaniem Kalinowskiej mimo prowadzonej edukacji ekologicznej nie ma w naszym kraju świadomego dbania o przyrodę i tylko niewielki odsetek Polaków martwi się problemami środowiska naturalnego. W porównaniu do średniej z krajów Unii Europejskiej, dwukrotnie mniej Polaków uważa za istotne zagadnienia ochrony środowiska (Kalinowska 2020). O konieczności i sposobach prowadzenia edukacji ekologicznej dzieci pisze Naplocha (2019), wskazując na konieczność różnorodności form edukacyjnych i możliwość np. wykorzystania bajek w edukacji ekologicznej najmłodszych dzieci. Autorka wskazuje na potrzebę stosowania nowoczesnej i rzetelnej wiedzy w przekazach literackich oraz dostosowanie ich do wieku i możliwości odbiorcy. Przykładowo – przedstawianie w starszych bajkach wilka jako zwierzęcia z natury złego, nie jest zgodne z wiedzą na temat biologii tych zwierząt i zaburza prawidłową wiedzę ekologiczną. Konieczność edukacji ekologicznej i to prowadzonej przez całe

życie, od najmłodszych lat aż do wieku dorosłego, podkreśla także Hłobił (2010) wskazując, że taka edukacja powinna być prowadzona w sposób interdyscyplinarny i kompleksowy. Zdaniem przywołanej autorki edukacja ekologiczna powinna być prowadzona dwoma ścieżkami: ścieżką formalną (w ramach programów nauczania) z wykorzystaniem systemów edukacji i kształcenia, oraz jako ścieżka nieformalna, obejmująca przedsięwzięcia o charakterze ekologicznym, od zasięgu lokalnego do globalnego (wystawy, szkolenia, pokazy i inne). Potrzebę kompleksowego podejścia do edukacji ekologicznej wskazują także autorzy analizujący problem treści ekologicznych w szkołach ponadpodstawowych (Mróz i in. 2020). Treści edukacji ekologicznej powinny znajdować się w programach wszystkich przedmiotów szkolnych, jednak tak się nie dzieje i zwykle są one przedstawiane tylko na lekcjach przedmiotów tzw. ścisłych (biologia, chemia, geografia).



Ryc. 1. Ideogram prezentujący tematykę, główne zagadnienia, sposoby pracy i odbiorców proponowanych zestawów edukacyjnych o zanieczyszczeniu światłem.

Warto zwrócić uwagę, że światło jest traktowane jedynie jako pozytywne zjawisko, dzięki któremu ludzkość mogła się rozwijać, a ciemność często kojarzyła się z zagrożeniem czy niebezpieczeństwem (Markiewicz 2017). Dlatego warto podkreślić, że pojawiają się jednak pozycje literaturowe dla dzieci uczące o ekologii nocy, jej pozytywnych aspektach i możliwościach poznania innego, ciekawego świata. Zestawienie takich pozycji można znaleźć na stronie internetowej *Mali czytelnicy* (2022). Jednak nie tylko dzieci mogą doświadczać

pełnej edukacji ekologicznej i literatura nie jest jedyną formą przekazywania tej wiedzy. Dlatego zespół Light Pollution Think Tank (LPTT) postanowił włączyć się w edukację ekologiczną poprzez stworzenie zestawów edukacyjnych (ryc. 1) do poznawania, doświadczania i eksperymentowania w celu poznania problemu zanieczyszczenia światłem, jego wpływu na środowisko i możliwości przeciwdziałania temu zjawisku.

W dalszej części rozdziału przedstawiono krótkie opisy zestawów edukacyjnych przygotowanych przez członków LPTT.

### **Zestaw astronomiczny**

Ludzkość od tysięcy lat wpatruje się w nocne niebo, starając się zrozumieć czym jest i jak działa Wszechświat oraz poznać swoje miejsce w nim. Z tej kosmicznej ciekawości powstała astronomia, ale nocne niebo miało też wpływ na inne dziedziny ludzkiej aktywności, np. sztukę czy filozofię.

Jednym z warunków niezbędnych do prowadzenia obserwacji astronomicznych jest ciemne nocne niebo. Dawniej było ono łatwo dostępne. Jednak obecnie każde miasto lub wieś, a czasem też drogi łączące miejscowości, są jasno oświetlone nocą, umożliwiając nam bezpieczne poruszanie się. Światło elektryczne ma jednak również wady. Jedną z nich dotyczy nocnego nieba. Światło z licznych zewnętrznych instalacji oświetleniowych rozprasza się w atmosferze powodując sztuczne, wyraźne zwiększenie jasności nocnego nieba. W efekcie zmniejsza się liczba widocznych gwiazd i innych obiektów astronomicznych. Im więcej sztucznego światła, tym większy poziom zanieczyszczenia światłem oraz większa jasność nocnego nieba i mniejsza liczba obiektów, które można na nim zaobserwować.

Proste obserwacje, które zawiera zestaw astronomiczny, pozwalają na ilościową ocenę jasności nocnego nieba, a więc też poziomu zanieczyszczenia światłem w danym miejscu. Dodatkowo osoba wykonująca pomiar w różnych miejscach (miasto, wieś, teren niezamieszkały) doświadczy tego, jak nocne niebo wygląda zależnie od poziomu zanieczyszczenia światłem.

Zestaw astronomiczny składa się z akcesoriów i materiałów umożliwiających wyznaczenie jasności nocnego bezchmurnego nieba. Zawiera trzy pakiety o różnym poziomie trudności, co pozwala na wykonanie obserwacji osobom o różnym stopniu znajomości nocnego nieba (umiejętność orientacji na sferze niebieskiej, rozpoznawania gwiazdozbiorów, itd.). W najprostszym pakiecie taka znajomość nie jest wymagana. W pakietach o wyższym stopniu obserwator musi potrafić odnaleźć określony gwiazdozbiór lub kierunek na niebie. Pomagają w tym dostarczone z zestawem instrukcje. Dodatkową korzyścią dla osób

wykonywujących pomiar jasności nieba może być więc opanowanie podstaw orientacji na niebie.

Pomiary w zestawie astronomicznym, w zależności od pakietu, wykonywane są za pomocą wzroku lub przy użyciu specjalnego fotometru. Każdy pakiet posiada szczegółowy opis wykonania obserwacji, potrzebne akcesoria oraz raport, który pozwala na opracowanie zebranych danych i uzyskanie wyniku końcowego. Podane są również informacje umożliwiające interpretację otrzymanego wyniku, tj. określenie stopnia degradacji nocnego nieba przez sztuczne światło w miejscu wykonanej obserwacji.

### **Zestaw biologii roślin**

Celem zestawu jest zrozumienie problemu, jaki niesie zanieczyszczenie światłem dla roślin, co wymaga po pierwsze uświadomienia sobie, że światło jest przez rośliny odbierane jako sygnał i wpływa na ich rozwój.

Dlatego pierwsze zagadnienie ma pokazać, jak światło reguluje wzrost i rozwój roślin. Na karcie pracy należy zaznaczyć różnice w wyglądzie pędów i liści roślin (wielkość, długość, kolor, sztywność) i wyciągnąć wnioski czy światło stymuluje czy hamuje rozwój danego organu. Powinno się zwrócić uwagę, że skoro światło wpływa na rozwój roślin, to jako bodziec musiało być odebrane – można zapoznać się z wiedzą o fotoreceptorach roślinnych. Więcej informacji o roślinnych fotoreceptorach można znaleźć w pracy Wojciechowskiej (2019).

Ważne jest też zjawisko fotomorfogenezy, czyli wpływu światła na wzrost i rozwój roślin (Lewak i in. 2019). Eksperyment proponowany jako średni poziom trudności wymaga od wykonujących już większej precyzji. Należy dokładnie zapoznać się z instrukcją, jak założyć doświadczenie, aby wykazać czy zanieczyszczenie światłem wpływa na starzenie roślin. W dobrze wykonanym eksperymencie badacze zauważają, że nadmiar światła – zanieczyszczenie światłem – to czynnik stresowy i przyspiesza starzenie tkanek. Starzenie to naturalny proces obserwowany u roślin. Najłatwiej zaobserwować go podczas jesiennego przebarwiania się liści. Jednak ten proces jest bardzo szeroko regulowany zarówno przez czynniki wewnętrzne organizmu jak i przez czynniki środowiskowe. Różne czynniki stresowe zwykle przyspieszają starzenie. Można zapoznać się z rodzajami starzenia i objawami starzenia u roślin (Kopcewicz 2015) i należy zwrócić uwagę, aby ćwiczenie wykonać w odpowiedniej liczbie powtórzeń – można przyswoić sobie informacje o metodzie eksperymentalnej i jej cechach w prowadzeniu prac naukowych. Ważne jest, aby na szalce było około 10 krążków i aby przygotować po 2–3 szalki z każdego wariantu eksperymentu. Na karcie pracy dołączonej do zestawu można zapisywać

obserwacje – wygląd krążków w trakcie zakładania i po kilku dniach trwania doświadczenia, określić procent starzenia w obu wariantach.

W trzecim ćwiczeniu należy zmierzyć (zważyć) ilość wody, jaką roślina zużywa w procesie transpiracji. Rośliny pobierają wodę głównie za pomocą korzeni z podłoża. Woda ta jest dostarczana do całego organizmu (wszystkich żywych komórek) i wykorzystywana do prowadzenia procesów biochemicznych, uwadniania tkanek czy do procesu transpiracji. Transpiracja to utrata wody z rośliny na rzecz bardziej suchego ośrodka – atmosfery. Ta utrata zachodzi najszybciej przez aparaty szparkowe – niewielkie otwory znajdujące się na powierzchni organów roślin (głównie liści). Aparaty szparkowe mają zdolność do otwierania się i zamykania. Większość roślin klimatu umiarkowanego otwiera aparaty szparkowe za dnia i zamyka w nocy. Jednym z czynników wpływających na ruchy aparatów szparkowych jest światło. Otwarte za dnia aparaty szparkowe nie tylko biorą udział w transpiracji, ale także umożliwiają przenikanie dwutlenku węgla do wnętrza liści i zachodzenie procesu fotosyntezy. Rośliny pod wpływem zanieczyszczenia światłem otwierają aparaty szparkowe także w nocy i tracą więcej wody. Powinno się odpowiedzieć na pytanie, jak większa utrata wody przez roślinę będzie wpływać na nią oraz na środowisko, w którym żyje. Na karcie pracy należy zapisywać masę początkową doniczek oraz po przeprowadzonym eksperymencie, co pozwoli ocenić, gdzie straty wody były największe.

Wszystkie trzy eksperymenty pozwalają na pogłębienie wiedzy o biologii roślin, wpływie zanieczyszczenia światłem na ich życie, ale także mogą być podstawą do dyskusji uwzględniającej całe środowisko. Podstawy teoretyczne dotyczące wpływu światła w nocy na rośliny można poznać z prac naukowych (Kołton i in. 2021; Kołton i in. 2022; Czaja i Kołton 2022).

### **Zestaw ekologii owadów**

Zanieczyszczenie światłem jest czynnikiem silnie redukującym populacje nocnych owadów. Owady, zamiast kierować się do naturalnych źródeł nocnego światła, takich jak księżyc czy gwiazdy, podążają do sztucznego światła emitowanego przez latarnie uliczne, banery reklamowe czy nieosłonięte okna naszych mieszkań. W ten sposób tracą cenny czas, który powinny przeznaczyć na żerowanie i rozmnażanie, a w efekcie giną z wycieńczenia bądź na skutek ataku nocnych drapieżników, takich jak nietoperze, sowy czy pająki. Badania wskazują, że nawet 1/3 owadów przyciąganych przez źródła sztucznego światła nie dożywa świtu (Owens 2019). Jest to kluczowe dla przyszłości populacji, ponieważ wiele owadów w formie dorosłej (czyli zdolnej do rozmnażania) żyje tylko kilka dni, a część nie przeżywa więcej niż jedną dobę.

W przypadku środowisk o silnym zanieczyszczeniu światłem zarówno liczebność, jak i różnorodność gatunkowa owadów jest znacznie niższa niż w przypadku obszarów o niższym skażeniu światłem. Najwięcej owadów jest obecnych w środowisku o najmniejszym skażeniu światłem (np. las, droga wiejska), mniej w środowisku o średnim skażeniu światłem (park), a najmniej wśród intensywnie zabudowanych terenów miejskich o silnym zanieczyszczeniu światłem (centrum miasta, strefa przemysłowa).

Pakiet ma na celu zaznajomienie uczestników doświadczenia ze stanem populacji i różnorodnością gatunkową entomofauny środowisk o różnych poziomach zanieczyszczenia światłem. Doświadczenia należy przeprowadzić po zmroku od maja do września, w dobrych warunkach atmosferycznych (wysoka temperatura, brak opadów, brak silnego wiatru). Eksperyment można rozłożyć na kilka dni, jednak najlepiej jest go wykonać w ciągu jednego tygodnia. Celem prawidłowego zobrazowania problemu należy wybrać kilka miejsc o różnym poziomie zanieczyszczenia światłem, np.: centrum miasta, strefa przemysłowa, park miejski, wiejska droga gruntowa bez oświetlenia, las. Nie należy przeprowadzać doświadczenia w miejscach pozbawionych roślinności (drzew, krzewów, trawników). W karcie pracy należy określić poziom zanieczyszczenia światłem w promieniu około 100 metrów, stopień pokrycia terenu roślinnością, zabudową i drogami. Eksperyment polega na zawieszeniu prześcieradła za pomocą haczyków na gałęzi drzewa bądź na murze oraz zwabieniu do niego owadów znajdujących się w najbliższym otoczeniu za pomocą lampy UV. Aby możliwie jak najmniej zaburzyć rytm nocny owadów, lampa nie powinna być załączona dłużej, niż przez 15 minut. W momencie, gdy owady zaczynają gromadzić się na prześcieradle, należy rozpocząć ich liczenie, dodatkowo oświetlając je latarką. W najbardziej zaawansowanym wariancie doświadczenia można za pomocą dedykowanej aplikacji na smartfony oznaczyć owady do rzędu/rodziny/gatunku. Wszystkie wyniki należy zapisać w karcie pracy. Po zakończonym eksperymencie, przy wyłączonym oświetleniu, należy odczekać kilka minut, aż owady opuszczą prześcieradło. Po przeprowadzeniu doświadczenia w miejscach o różnych poziomach zanieczyszczenia światłem należy porównać wyniki liczebności oraz ewentualnie różnorodności gatunkowej owadów między powierzchniami. Uzupełniając do eksperymentu można przeprowadzić spacer przyrodniczy, oceniając, ile owadów gromadzi się wokół przydrożnych latarni, zlokalizowanych w różnych środowiskach (np.: centrum miasta, park, oświetlona podmiejska droga), czy pod nimi można znaleźć martwe osobniki, oraz czy przy latarniach znajdują się pajęczne sieci. Wyniki należy zapisać w karcie pracy.

Doświadczenie obrazuje, jak zanieczyszczenie sztucznym światłem zaburza nocne funkcjonowanie owadów poprzez zmianę ich zachowania oraz zwiększenie śmiertelności. Eksperyment pozwoli także zrozumieć, jak szkodliwe dla entomofauny jest umieszczanie sztucznego oświetlenia w dotychczas nieoświetlonych miejscach o wysokim udziale zieleni.

### **Zestaw medyczny**

Celem zestawu jest wskazanie uczestnikom programu istnienia zależności pomiędzy jakością snu a obecnością w sypialni sztucznego światła w nocy (ALAN). Inaczej mówiąc – chcemy pokazać, jak bardzo niekorzystnie na nasze funkcjonowanie w ciągu dnia wpływa zanieczyszczenie świetlne, w dużej mierze odpowiedzialne za złą jakość snu, który nie przynosi właściwego wypoczynku. Warto zauważyć, że dla organizmu nie ma znaczenia, czy to dodatkowe, zbędne światło pochodzi z zewnątrz (np. latarnie uliczne czy reklamy świecące w nasze okna) czy też „wytwarzamy” je sami w naszej sypialni, włączając odbiornik TV, komputer lub przeglądając przed snem zawartość smartfonu (Skwarło-Sońta 2020). Bowiem w każdym przypadku obecność światła, zwłaszcza zimnego białego ze znacznym udziałem niebieskiego, oświetlającego nasze oczy (nawet przez zamknięte powieki) pobudza w siatkówce specjalne receptory (nie będące czopkami i pręcikami odpowiedzialnymi za proces widzenia), które kierują tę informację na nerwową drogę pozawzrokową. Jest to szlak prowadzący do szyszynki, znajdującego się w mózgu gruczołu neuroendokrynowego, w którym w nocy syntetyzowany jest hormon melatonina, a światło hamuje ten proces. Melatonina jest zwana także hormonem ciemności, co oznacza, że krążąc z krwią informuje komórki i narządy organizmu o panującej na zewnątrz ciemności i warunkach odpowiednich do snu (Skwarło-Sońta 2014). Jeśli jednak noc jest zakłócona przez obecność sztucznego światła z dowolnego źródła, to synteza melatoniny zostaje zablokowana. Pierwszym skutkiem niedoboru hormonu ciemności jest niska jakość snu i gorsze samopoczucie następnego dnia (Skwarło-Sońta 2020). W dalszej kolejności następuje rozregulowanie (desynchronizacja) procesów przebiegających w rytmie dobowym i zaczynamy odczuwać dyskomfort. Jeśli taka desynchronizacja trwa długo (miesiące, a nawet lata), to może skutkować rozwojem chorób zwanych cywilizacyjnymi, bowiem częstość ich występowania wzrasta wraz z coraz bardziej powszechnym skażeniem światłem. Problem ten został szczegółowo omówiony w innym rozdziale niniejszej monografii, zatytułowanym: „Wpływ ALAN na rytm snu i czuwania oraz zdrowie człowieka”, natomiast praktycznie możemy przekonać się o korzystnym wpływie ciemnej nocy na własny sen, prowadząc dzienniczek snu, zaproponowany w „Zestawie medycznym”. Dzienniczek został opracowany



na podstawie wytycznych zawartych w publikacji lekarzy i biologów, zajmujących się zaburzeniami snu związanymi z występowaniem czynników, niekorzystnie modyfikujących rytm dobowy człowieka (Wichniak i in. 2017). Do takich czynników należy właśnie skażenie światłem, przed którym musimy się chronić.

### **Zestaw społeczny**

Zestaw edukacyjny społeczny, to zestaw stworzony z myślą niesienia wsparcia dla osób, które chcą dążyć do uświadamiania ludziom szkodliwości zanieczyszczenia światłem. Zawiera on takie akcesoria jak:

- poradnik multidyscyplinarny o zanieczyszczeniu światłem, ulotka, tabliczka wzór przedstawiająca dobre i złe oprawy, czerwony mazak,
- oprawa o zmiennej lub prawidłowej CCT do zaprezentowania sąsiadowi,
- wysięgnik do odsunięcia oprawy LED od ściany – tzw. uchwyt dystansowy,
- żarówki „grzybki” do podmiany w oprawach z otwartym źródłem światła,
- żarówki downlight LED z soczewką GU10 z adapterem E14/GU10,
- luksomierz do ogólnego określenia ingerencji światła z sąsiedztwa,
- przykładowy reduktor mocy dla oświetlenia dekoracyjnego (wpinany do gniazdka).

W pakiecie uwzględnione są trzy stopnie zaawansowania praktycznych zadań związanych z przeciwdziałaniem zanieczyszczeniu światłem. Poziomy trudności to:

- I. poziom podstawowy – zachęca do samodzielnego podjęcia inicjatywy w zakresie tzw. czynnej redukcji zanieczyszczenia światłem w sąsiedztwie. Obszar działań na tym poziomie obejmuje sąsiedzkie gospodarstwa domowe, budynki mieszkalne, bloki, itp. Działanie obejmuje rozmowy z sąsiadami na temat sztucznego światła, pokazywanie lepszych przykładów oświetlenia, przedstawianie korzyści związanych z redukowaniem nadmiaru światła sztucznego, itp.
- II. poziom średni – zwiększony obszar działań, w którym zachęca się zainteresowanych uczestników zadania do podjęcia się stworzenia szerszego ruchu poparcia w odniesieniu do osiedla, dzielnicy, sołectwa. Dołączony zostaje raport analizy statystycznej źródeł sztucznego światła; organizowanie spotkań dla szerszej grupy odbiorców (prelekcje, pokazy teleskopowe, itp.), podczas których poruszana jest kwestia szkodliwości zanieczyszczenia światłem; tworzenie petycji, ustalenie, jaki organ zajmuje się oświetleniem na danym terenie, itp.

- III. poziom zaawansowany – stopień najtrudniejszy do wykonania metodą testowania trzech ścieżek rozwiązań na terenie gmin, powiatów, itp. W oparciu o koncepcję racjonalnej polityki oświateniowej w praktyce, zgodnej z wytycznymi Dark-Sky Community (IDA). Dołączona zostaje karta postępu i monitorowania aktywności społecznej. Stworzenie listy „sprzymierzeńców”, grona reprezentantów różnych grup społecznych.

Przedstawiony zestaw pomaga w przeciwdziałaniu zanieczyszczeniu światłem w sposób dostępny dla każdego, kto chciałby zająć się czynną ochroną ciemnego nieba w swoim środowisku. Dołączone akcesoria mają za zadanie przedstawienie nowych i lepszych rozwiązań, nie są przeznaczone do rozdawania, a jedynie chwilowego użycia / zamontowania w celu zademonstrowania skuteczności proponowanych rozwiązań. Wszystkie poziomy trudności są niewątpliwie niełatwe do wykonania w jednym miejscu, natomiast działanie nawet na stopniu podstawowym, ma przede wszystkim na celu uświadamianie mieszkańcom szkodliwości nadmiernej ilości sztucznego światła. Pakiet adresowany jest do tych osób, które czują potrzebę podjęcia działań w swoim otoczeniu i chcą przekonać innych do stosowania zrównoważonego oświetlenia.

### **Zestaw techniczny**

Ideą zastawu jest zwrócenie uwagi na fakt, że na poziom zanieczyszczenia światłem istotny wpływ ma rodzaj zainstalowanej oprawy oświetleniowej (która w mowie potocznej często nazywana jest „lampą”). Asortyment zewnętrznych opraw oświetleniowych jest olbrzymi, a wśród nich są takie, które emitują światło w dolną i górną półprzestrzeń. Z punktu widzenia minimalizacji niekorzystnego zjawiska jakim jest zanieczyszczenie światłem, najbardziej rekomendowane są te oprawy oświetleniowe, które świecą wyłącznie „w dół”. Informacji na temat sposobu dystrybucji światła przez oprawę oświetleniową dostarczają krzywe światłości, które zazwyczaj prezentowane są w formie wykresu biegunowego.

Korzystając z przygotowanego „katalogu” opraw oświetleniowych, w którym zamieszczono zdjęcia opraw oświetleniowych wraz z krzywymi światłości, należy przypisać je do jednej z dwóch grup. Grupa pierwsza to oprawy oświetleniowe, które nie emitują strumienia świetlnego ku górze. W takim przypadku krzywa światłości na wykresie będzie ulokowana poniżej linii poziomej – w obszarze „dolna półprzestrzeń”. Do grupy drugiej należy przypisać te oprawy oświetleniowe, których fragment (lub całość) krzywej światłości będzie ulokowany nad linią poziomą.

W dalszej części, w przypadku opraw oświetleniowych przypisanych do grupy drugiej, należy je uszeregować od „najlepszej” do „najgorszej”. Z punktu

widzenia zanieczyszczenia światłem „najgorszą” oprawą oświetleniową jest ta, która najczęściej światła wysyła w górną półprzestrzeń (ku górze). Innymi słowy – im większe pole powierzchni krzywej światłości znajduje się powyżej poziomej linii, w tym większym stopniu taka oprawa oświetleniowa niekorzystnie oddziałuje na środowisko, wzmagając zanieczyszczenie światłem. Poszczególne „plansze” z oprawami oświetleniowymi dostarczone w zestawie należy podzielić na dwie grupy.

Drugi poziom trudności odnosi się do wiadomości, że obecnie na rynku dostępny jest bardzo szeroki asortyment rozmaitych źródeł światła (bardzo często nazywanych w mowie potocznej „żarówkami”). Z uwagi na różny mechanizm wytwarzania światła, różne są także charakterystyki spektralne poszczególnych źródeł światła. Posiłkując się internetem należy przypisać odpowiednie charakterystyki spektralne (zamieszczone w zestawie) do poszczególnych zdjęć źródeł światła.

### **Zestaw turystyczny**

Parki i rezerwy ciemnego nieba, inaczej nazywane parkami gwieźdnego nieba, lub gwieźdnymi parkami, pełniące nie tylko funkcje ochrony nocnego krajobrazu, ale także funkcje turystyczne i propagowania wiedzy o zanieczyszczeniu światłem, ustanawiane są od lat 90. ubiegłego wieku. Dotychczas utworzono ich ponad dwieście na całym świecie, lecz niemal do końca pierwszej dekady XXI wieku powoływanie tego rodzaju miejsc było procesem incydentalnym i w pewnym sensie unikatowym w całym systemie obszarów ochrony przyrody (DSAG 2023). Mimo swej wyjątkowości, funkcjonowanie parków ciemnego nieba nie przebiło się do szerszej świadomości społecznej nie tylko w ujęciu międzynarodowym, ale również w skali lokalnych społeczności zamieszkujących okolice danego parku, a nawet wśród niektórych pracowników punktów informacji turystycznej (m.in. McMahon 2006; Iwanicki 2021, 2022).

Spółeczna świadomość na temat obszarów chroniących nocny krajobraz jest na podobnie niskim poziomie jak ogólna wiedza o źródłach i skutkach zanieczyszczenia sztucznym światłem (m.in. Lyytimäki i Rinne 2013; Iwanicki 2014; TNS 2015; Haagen-Schützenhöfer i Kopper 2019), mimo wielu dotychczasowych publikacji popularnonaukowych, otwartych prelekcji, doniesień prasowych, programów radiowych i telewizyjnych, czy innych aktywności medialnych i edukacyjnych z zakresu propagowania wiedzy

o problematyce nadmiernej obecności sztucznego światła nocą<sup>1</sup>. Niniejszy podrozdział ma na celu opisanie założeń turystycznego zestawu edukacyjnego, opracowanego w celu zwiększenia, wśród różnych grup wiekowych, społecznej świadomości o miejscach prowadzących ochronę ciemnego nieba w Polsce i Europie.

Materiały edukacyjne, wchodzące w skład pakietu, zostały podzielone na trzy grupy odbiorców: a) pakiet o niskim poziomie trudności, skierowany do wszystkich grup, począwszy od pierwszych klas szkoły podstawowej; b) pakiet o średnim poziomie trudności, skierowany także do wszystkich grup, jednak zalecany od czwartej klasy szkoły podstawowej; c) pakiet o wyższym stopniu trudności, zalecany m.in. dla końcowych klas szkół podstawowych, uczniów szkół średnich lub studentów.

Pierwszy z wymienionych pakietów, tj. o niskim poziomie trudności, złożony jest z gry planszowej, podczas której gracze „odwiedzają” wszystkie, certyfikowane w ramach Programu Ciemne Niebo – Polska<sup>2</sup>, miejsca prowadzące bierną i czynną ochronę nocnego krajobrazu, oraz inne, wybrane przez autora gry miejsca związane z astroturystyką. Koncepcja gry wymusza na uczestnikach zapoznanie się z podstawowymi informacjami o mijanych i odwiedzanych miejscach (są opisane na kartach dołączonych do gry), a podkład planszy, stanowiący mapę radiancji sztucznego światła w Polsce według danych z instrumentu VIIRS satelity Suomi-NPP<sup>3</sup> (dla roku 2022), pomaga w przyswojeniu wiedzy o obszarach potencjalnie najbardziej dotkniętych skutkami zanieczyszczenia sztucznym światłem. Podkład planszy został utworzony w oparciu o mapy dostępne na stronie aplikacji [www.lightpollutionmap.info](http://www.lightpollutionmap.info) autorstwa Jurija Stare<sup>4</sup>. Po odbyciu gry uczestnicy mają możliwość sprawdzenia swojej nowo nabytej wiedzy na temat polskich obszarów ochrony ciemnego nieba rozwiązując quiz on-line dostępny na stronie LPTT.

---

<sup>1</sup> Autorzy rozdziału spotykali się często z sytuacją, że większość młodzieży, do której kierowali swoje wykłady popularnonaukowe, nie słyszała nigdy o obszarach ochrony ciemnego nieba, lub ich wiedza o takich miejscach była na niskim poziomie. Problem ten był głównym uzasadnieniem utworzenia pakietu o tematyce turystycznej.

<sup>2</sup> Program Ciemne Niebo – Polska został powołany w 2004 roku przez Zarząd Stowarzyszenia POLARIS-OPP z siedzibą w Sopotni Wielkie. Od tego czasu w ramach programu certyfikowano 7 obszarów ochrony ciemnego nieba (stan na 20.06.2023 roku). Więcej o programie na stronie <https://ciemneniebo.pl/pl/>.

<sup>3</sup> Skrót od Suomi National Polar-orbiting Partnership, satelity operującego na orbicie od 2011 r. Urządzenie VIIRS (ang. *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) odpowiada za gromadzenie obrazów radiometrycznych w zakresie widzialnym i podczerwonym lądów, atmosfery, lodu i oceanów.

<sup>4</sup> Słoweński specjalista GIS z organizacji Dark-Sky Slovenia, współpracujący z LPTT.

Pakiet o średnim poziomie trudności ma identyczne założenia metodyczne, co wcześniej opisany, z jedną różnicą – podkład planszy stanowi mapa Europy, a gracze mają do przemierzenia niemal cały kontynent i zaznaczone na nim wybrane parki, rezerwy i społeczności ciemnego nieba. Tę samą grę planszową posiada trzeci, najtrudniejszy z pakietów turystycznych. Dodatkowo dołączone są do niego dwa zadania. Pierwsze polega na opracowaniu propozycji astroturystycznej wycieczki na terenie Izerskiego Parku Ciemnego Nieba. Pomocami w tym zadaniu są szczegółowa mapa turystyczna Gór Izerskich w skali 1:25 000 oraz standardowy formularz programu i kalkulacji wycieczki do wypełnienia. Drugim zadaniem jest wytypowanie obszarów o największym potencjale pod względem utworzenia nowego parku ciemnego nieba w Polsce, na podstawie analizy treści map zanieczyszczenia sztucznym światłem dla każdego z województw, oraz dołączonych do każdej mapy przeźroczy z zaznaczonymi granicami parków narodowych i krajobrazowych.

Użycie, w opisanych pakietach, gry planszowej miało na celu realizację idei „edukacji poprzez zabawę”. Poziom trudności zaplanowanych zadań umożliwia ich wykonanie pod opieką nauczyciela, rodzica lub w gronie własnym uczniów, studentów i pozostałych odbiorców. Istotnym plusem gry planszowej jest możliwość jej wielokrotnego wykorzystania i zabawy w gronie kilku uczestników, przy czym dodatkowe zadania (opracowanie wycieczki, oraz selekcja potencjalnych miejsc pod nowy park ciemnego nieba) mogą być wykonane indywidualnie przez jedną osobę, lub w grupie, z wykorzystaniem metody burzy mózgów.

### **Zestaw urbanistyczny (czytanie mapy)**

Zanieczyszczenie światłem stanowi takie samo zagrożenie dla środowiska, jak zanieczyszczenie powietrza pyłami zawieszonymi, mimo że polskie przepisy prawa nie wskazują tego w jednoznaczny sposób. Zabudowa rozlewająca się na obrzeża miasta wprowadza oświetlenie na tereny, które do tej pory oświetlone były tylko w minimalnym stopniu lub nie były oświetlone wcale. Powoduje to zaburzenia w przyrodzie i nocnym krajobrazie, np. wycofywanie się zwierząt ze swoich siedlisk czy fragmentację nocnych ekosystemów. Odpowiedzialne planowanie miasta i kształtowanie zagospodarowania mogą być narzędziem służącym minimalizowaniu tego zagrożenia.

Zestaw urbanistyczny (czytanie mapy) pozwala przeanalizować relacje pomiędzy urbanizacją a poziomem zanieczyszczenia światłem. Na zestaw składają się instrukcje do dwóch poziomów trudności: dla uczniów klas 1–3 i od klasy 4. Instrukcje zawierają zdjęcia satelitarne wykonywane za dnia, zdjęcia

nocne tych samych terenów oraz opis. W opisie zawarta została informacja, na co należy zwrócić uwagę podczas interpretacji i porównania obu zdjęć.

Umiejętność interpretacji map ułatwi: identyfikowanie funkcji lub części miasta, które emitują światło w porze nocnej, ocenę sposobu rozmieszczenia tych funkcji i ich wpływu na otoczenie, a także pomoże sformułować odpowiednie wnioski z zakresu planowania miasta.

## Podsumowanie

Zestawy edukacyjne można wypożyczyć nieodpłatnie kontaktując się ze Stowarzyszeniem POLARIS-OPP ([www.polaris.org.pl](http://www.polaris.org.pl)). Mamy nadzieję, że różnorodność tematyczna zachęci do wypróbowania zaproponowanych zestawów. Będziemy wdzięczni za uwagi, pomysły, propozycje udoskonalenia czy zmodyfikowania prezentowanych sposobów poznawania i zapobiegania zanieczyszczenia światłem. Zachęcamy do podzielenia się spostrzeżeniami oraz współpracy z LPTT w celu ochrony naturalnej nocy.

## Podziękowania

Zestawy edukacyjne zostały dofinansowane ze środków Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego w ramach Rządowego Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich na lata 2018–2030 PROO.

## Literatura

- Czaja M., Kołton A., 2022. How light pollution can affect spring development of urban trees and shrubs. *Urban Forestry & Urban Greening* 77: 127753. DOI:10.1016/j.ufug.2022.127753.
- DSAG, 2023. World list of dark sky places. Updated 1th March 2023. [http://darkskeyparks.org/dsag/2021-02-28\\_DSAG\\_word\\_list.htm](http://darkskeyparks.org/dsag/2021-02-28_DSAG_word_list.htm).
- Haagen-Schützenhöfer C., Kopper M., 2019. Light pollution – an interesting context for teaching and learning optics. *Journal of Physics. Conference Series*: 1287.
- Hłobił A., 2010. Edukacja ekologiczna w praktyce szkolnej. *Rocznik Ochrona Środowiska* 12: 277–298.
- Iwanicki G., 2014. Polityka oświetleniowa w aspekcie ochrony nocnego krajobrazu – na przykładzie wybranych gmin powiatu lubelskiego. *Problemy Ekologii Krajobrazu* 37: 15–21.
- Iwanicki G., 2021. Are dark-sky parks recognisable in society? The example of Izera Dark-Sky Park. [in:] Ścieżor T. (ed.), *Ecological and astronomical aspects of light pollution*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej: 133–142.
- Iwanicki G., 2022. Astro-tourism in the Czech–Polish Izera Dark Sky Park. [in:] Novelli M., Cheer J.M., Dolezal C., Jones A., Milano C. (eds.), *Handbook of Niche Tourism. Research Handbooks in Tourism series*. Edward Elgar: 2–13.

- Kalinowska A., 2020. Edukacja, kultura i wartości zrównoważonego rozwoju. [w:] Szymalski W. (red.), *100 lat ochrony środowiska w Polsce*. Instytut na Rzecz Ekorozwoju, Radom.
- Kołton A., Wojciechowska R., Czaja M., 2022. Modyfikacja budowy morfologicznej liści klonu jawora i dławiszka okrągłolistnego na skutek zanieczyszczenia światłem nocą. [w:] Tabaka P. (red.), *Sztuczne światło nocą między zagrożeniem a rozwojem*, Monografie Politechniki Łódzkiej Nr 2366, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź.
- Kołton A., Czaja M., Długosz-Grochowska O., 2021. Artificial lighting and light pollution from the plant's point of view. [w:] Ścieżor T. (red.), *Ecological and astronomical aspects of light pollution*. Cracow University of Technology, Kraków: 39–54.
- Kopcewicz J., 2015. Starzenie się roślin. [w:] Kopcewicz J., Lewak S. (red.), *Fizjologia roślin*. PWN, Warszawa: 589–606.
- Lewak S., Kopcewicz J., Jaworski K., 2019. *Fizjologia roślin. Wprowadzenie*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN: 123–125.
- Lyytimäki J., Rinne J., 2013. Voices for the darkness: on-line survey on public perceptions on light pollution as an environmental problem. *Journal of Integrative Environmental Sciences* 10(2): 127–139.
- Mali czytelnicy*, 2022. <https://malicytelnicy.pl/ksiazki-dla-dzieci-o-tym-co-sie-dzieje-w-nocy-zestawienie/>.
- Markiewicz M., 2017. Powrót do ciemności. *Anthropos?* 26: 31–40.
- McMahon P., 2006. Wilderness stargazing, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 100(2): 75.
- Mróz A., Ocetkiewicz I., Tomaszewska B. 2020. What should be included in education programmes – The socio-education analysis for sustainable management of natural resources. *Journal of Cleaner Production* 250: 119556.
- Naplocha A., 2019. Nie taki wilk straszny... O edukacji ekologicznej w kontekście bajki Wilk Ambaras Tomasza Samojlika i jej wpływie na kształtowanie postaw proekologicznych dzieci i młodzieży względem wilków. *Studia Edukacyjne* 53: 321–340.
- Owens A.C.S., Cochard P., Durrant J., Farnworth B., Perkin E.K., Seymoure B., 2019. Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation* 108259. DOI:10.1016/j.biocon.2019.108259.
- Skwarło-Sońta K., 2014. Melatonina: hormon snu czy hormon ciemności? *Kosmos* 63(2): 223–231.
- Skwarło-Sońta K., 2020. Światło w nocy: czy tylko zaburzenia jakości snu? Mechanizmy epigenetyczne pośredniczące we wpływie zanieczyszczenia świetlnego na organizm człowieka. *Kosmos* 69(3): 447–459.
- TNS, 2015. Problem hałasu, odoru i zanieczyszczenia światłem w oczach Polaków. *Raport TNS Polska dla Ministerstwo Środowiska*, listopad 2015.
- Wichniak A., Jankowski K.S., Skalski M., Skwarło-Sońta K., Zawilska J.B., Żarowski M., Poradowska E., Jernajczyk W., 2017. Standardy leczenia zaburzeń rytmu okołodobowego snu i czuwania opracowane przez Polskie Towarzystwo Badań

nad Snem i Sekcją Psychiatrii Biologicznej Polskiego Towarzystwa Psychiatrycznego. Część I. Fizjologia, metody oceny i oddziaływania terapeutyczne. *Psychiatr. Pol. Online First* 61: 1–22.

Wojciechowska R., 2019. Czy oświetlenie nocne może zaburzać funkcjonowanie roślin? [w:] Kotarba A.Z. (red.), *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*. Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa: 39–54.

## Streszczenie

Zanieczyszczenie światłem to problem globalny, ale świadomość jego istnienia jest raczej ograniczona. Mówi się o zanieczyszczeniu powietrza, gleby czy wody różnymi substancjami chemicznymi, jednak nawet w podręcznikach dotyczących ochrony środowiska brakuje rozdziału o zagrożeniu, jakie stanowi sztuczne światło emitowane w nocy. Dlatego zespół pracujący pod wspólnym szyldem Light Pollution Think Tank (LPTT) opracował zestawy edukacyjne, które można wykorzystać zarówno na lekcjach (w szkole, przedszkolu, kółku zainteresowań, zajęciach pozaszkolnych) jak i w domu, przez osoby chcące poszerzyć swoją wiedzę na temat zanieczyszczenia światłem. Zestawy uwzględniają takie zagadnienia, jak oddziaływanie tego zagrożenia na środowisko czy zdrowie ludzi oraz możliwość jego ograniczania i przeciwdziałania zwiększającej się emisji światła w nocy. Do tej pory opracowano 8 zestawów: astronomiczny, biologii roślin, ekologii owadów, medyczny, społeczny, techniczny, turystyczny i urbanistyczny (czytanie mapy). W skład każdego zestawu wchodzi instrukcja wykonania pomiaru, obserwacji czy eksperymentu (w zależności od specyfiki zestawu) oraz karta do zapisywania wyników i wniosków. Dodatkowo zestawy zawierają akcesoria umożliwiające wykonanie opisanych zadań. Każdy zestaw mieści się w pudełku, które można w prosty sposób przesłać do zainteresowanych osób. Autorzy zestawów przewidzieli różny stopień zaawansowania wykonawców – większość pakietów ma wersję poziomu trudności podstawową, czyli łatwiejszą oraz bardziej skomplikowaną, co powinno ułatwić rozpowszechnianie prezentowanych zestawów i budowanie wiedzy o zanieczyszczeniu światłem. W przyszłości planujemy uruchomienie platformy „Pochwal się swoim wynikiem”, gromadzącej dane uzyskane przez użytkowników zestawów w toku własnych obserwacji, pomiarów i eksperymentów, co umożliwi nie tylko stworzenie ogólnopolskiej bazy danych informującej o zainteresowaniu zestawami, ich wykorzystaniu i zapotrzebowaniu na podobne inicjatywy, ale także pozwoli na szerokie udostępnianie wiedzy i wyników dotyczących zanieczyszczenia światłem w Polsce. Użytkownikom zestawów życzymy miłej pracy i zabawy, a także prosimy o przesyłanie uwag i sugestii, jak udoskonalić i modernizować nasze zestawy.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, ekologia nocy, naturalna ciemność, edukacja ekologiczna, prawidłowe oprawy zewnętrzne.



## **Education through experiment and research games – example of educational kits**

### **Summary**

Light pollution is a global problem, but its awareness is rather limited. The pollution of air, soil or water by various chemicals is widely discussed but the risk of artificial light at night is not mentioned even in the textbooks on environmental protection. That is why the team working under the Light Pollution Think Tank (LPTT) label has developed educational kits that can be used both in lessons (school, kindergarten, club, after school activities) and at home by those interested in learning more about light pollution. The impact of light pollution on the environment or human health, as well as the possibility of reducing it and counteracting increasing light emissions at night, are issues covered in the kits. To date, 8 kits have been created: astronomical, medical, plant biology, insect ecology, social, technical, urban (map reading) and tourism. Each kit includes instructions for carrying out the measurements, observations or experiment (depending on the specifics of the kit) and a card for recording the results and conclusions. All the accessories to perform the tasks described are included in each kit. Each kit is contained in a box, which can be easily sent to the interested audience. A different level of difficulty has been planned by the authors – most of the kits have a version of the basic difficulty level, i.e. easier, and a more complex one. This approach should make it possible to widely disseminate the presented kits and build knowledge about light pollution. The launch of 'The share your results' platform, which will collect data obtained by kit users in the course of their own observations, measurements and experiments, is planned for the future. This will not only enable the creation of a nationwide database informing about the interest in the kits, their use, and the demand for similar initiatives, but will also allow the knowledge and results regarding light pollution in Poland to be shared widely. We wish the users of the kits a good work and play experience, and ask for comments and suggestions on how to improve and upgrade our kits.

**Key words:** light pollution, night ecology, natural darkness, ecological education, correct outdoor luminaires.

**Dane kontaktowe autorów:**

**Anna Kołton**

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa  
e-mail: anna.kolton@urk.edu.pl

**Grzegorz Iwanicki**

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie  
Instytut Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej  
e-mail: grzegorz.iwanicki@mail.umcs.pl

**Sylwester Kołomański**

Uniwersytet Wrocławski  
Instytut Astronomiczny  
e-mail: kolomanski@astro.uni.wroc.pl

**Agnieszka Machnowska**

Stowarzyszenie POLARIS-OPP  
Program Ciemne Niebo – Polska  
e-mail: ajewdokimow@gmail.com

**Piotr Nawalkowski**

Stowarzyszenie POLARIS-OPP  
Program Ciemne Niebo – Polska  
e-mail: ciemnieniebo@op.pl

**Karolina Skorb**

Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt Polskiej Akademii Nauk  
Zespół Ekologii Krajobrazu  
e-mail: skorb.karolina@gmail.com

**Krystyna Skwarło-Sońta**

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Biologii  
e-mail: k.skwarlo-sont@uw.edu.pl

**Przemysław Tabaka**

Politechnika Łódzka  
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
e-mail: przemyslaw.tabaka@p.lodz.pl



Nocna panorama Torunia wykonana w kierunku poligonu artyleryjskiego, częściowo położonego w lewobrzeżnej części miasta (fot. Mieczysław Kunz)



Light Pollution  
Think Tank



**KOMITET  
DO SPRAW  
POŻYTKU  
PUBLICZNEGO**



Narodowy Instytut Wolności  
Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego



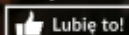
Rządowy Program  
Rozwoju Organizacji  
Obywatelskich  
na lata 2018–2030

**PROO**

SFINANSOWANO ZE ŚRODKÓW NARODOWEGO INSTYTUTU WOLNOŚCI – CENTRUM  
ROZWOJU SPOŁECZEŃSTWA OBYWATELSKIEGO W RAMACH RZĄDOWEGO PROGRAMU  
ROZWOJU ORGANIZACJI OBYWATELSKICH NA LATA 2018–2030 PROO



Dołącz do nas!



Lubię to!

[www.wydawnictwo.umk.pl](http://www.wydawnictwo.umk.pl)

ISBN 978-83-231-5191-3



9 788323 151913