

Anna GLODEK
Politechnika Śląska

WIELOPARAMETRYCZNA ANALIZA CZYNNIKÓW KSZTAŁTUJĄCYCH ŁUNĘ ŚWIETLĄ Z WYKORZYSTANIEM DANYCH SATELITARNYCH I OBSERWACJI OBYWATELSKICH

Streszczenie. Niniejsze badanie przedstawia wieloparametryczną analizę czynników wpływających na łunę świetlną z wykorzystaniem obserwacji satelitarnych, danych atmosferycznych oraz pomiarów realizowanych w ramach nauki obywatelskiej (ang. *citizen science*). Zaproponowane podejście integruje dane pochodzące z systemów Copernicus, CAMS, VIIRS oraz programu Globe at Night w celu zbadania wpływu aerozoli, zachmurzenia, urbanizacji i warunków środowiskowych na jasność nocnego nieba w różnych regionach świata.

MULTIPARAMETER ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING SKYGLOW USING SATELLITE DATA AND CITIZEN SCIENCE OBSERVATIONS

Summary. This study presents a multiparameter analysis of factors influencing skyglow using satellite observations, atmospheric datasets, and citizen science measurements. The proposed approach integrates Copernicus, CAMS, VIIRS, and Globe at Night data to investigate the effects of aerosols, clouds, urbanization, and environmental conditions on night sky brightness across diverse regions worldwide.

1. Wprowadzenie

Sztuczne światło nocne (ang. *Artificial Light at Night – ALAN*) jest obecnie uznawane za istotną formę antropogenicznego zanieczyszczenia środowiska [5]. Jego oddziaływanie obejmuje zaburzenia rytmów okołodobowych, zmiany zachowań zwierząt, degradację ekosystemów oraz ograniczenie możliwości prowadzenia obserwacji astronomicznych. Zanieczyszczenie światłem definiowane jest jako suma wszystkich negatywnych skutków wynikających z obecności sztucznego oświetlenia w środowisku nocnym. Jednym z jego najbardziej widocznych przejawów jest zjawisko łuny świetlnej (ang. *skyglow*), czyli rozjaśnienie nocnego nieba nad terenami zurbanizowanymi. Oprócz łuny świetlnej zanieczyszczenie obejmuje również kilka odrębnych zjawisk różniących się mechanizmem powstawania, skalą oddziaływania oraz konsekwencjami środowiskowymi. Zgodnie z klasyfikacją stosowaną przez organizację DarkSky International oraz Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE), do podstawowych form zanieczyszczenia światłem zalicza się również olśnienie

(ang. *glare*), przenikanie światła (ang. *light trespass*) oraz nadmierne zagęszczenie źródeł światła (ang. *clutter*) [4, 8]. Olśnienie definiowane jest jako nadmierna jasność powodująca dyskomfort wzrokowy oraz pogorszenie zdolności obserwacji otoczenia, zwłaszcza obiektów znajdujących się w obszarach zacienionych. Zjawisko to ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz jakości życia mieszkańców obszarów zurbanizowanych [4, 16]. Przenikanie światła występuje w sytuacji, gdy światło dociera do obszarów, które nie powinny być oświetlane lub gdzie oświetlenie nie jest wymagane. Zjawisko to powoduje między innymi zakłócenia rytmów dobowych ludzi i zwierząt oraz pogorszenie komfortu życia mieszkańców [8, 15]. Nadmierne zagęszczenie źródeł światła oznacza występowanie intensywnych, chaotycznych i nadmiernie skoncentrowanych skupisk źródeł światła, charakterystycznych przede wszystkim dla dużych aglomeracji miejskich. Zjawisko to utrudnia percepcję przestrzeni, zwiększa poziom olśnienia oraz przyczynia się do wzrostu intensywności łuny świetlnej [13, 16]. Spośród wymienionych form zanieczyszczenia światłem szczególne znaczenie środowiskowe i badawcze ma łuna świetlna, ponieważ jej intensywność zależy od wielu współdziałających czynników antropogenicznych, atmosferycznych i środowiskowych. Właśnie ta wieloczynnikowość sprawia, że modelowanie łuny świetlnej pozostaje jednym z najbardziej złożonych problemów współczesnych badań nad zanieczyszczeniem światłem [12, 21]. Oprócz natężenia i widma promieniowania, istotnym, choć znacznie rzadziej analizowanym parametrem sztucznego oświetlenia jest jego migotanie (ang. *flicker*), które może oddziaływać na organizmy żywe nawet wtedy, gdy nie jest postrzegane przez człowieka [10]. Negatywne oddziaływanie sztucznego światła zostało potwierdzone dla wielu grup organizmów, takich jak: żółwie morskie, świetliki, łososie atlantyckie, żaby drzewne, motyle [8]. W przypadku ludzi ekspozycja na sztuczne światło nocne prowadzi do zaburzeń wydzielania melatoniny, problemów ze snem oraz zwiększonego ryzyka występowania chorób metabolicznych [15]. Wpływ ten obserwowany jest również w środowisku miejskim, gdzie nadmierne oświetlenie generuje dodatkowe koszty energetyczne.

2. Materiały i metody

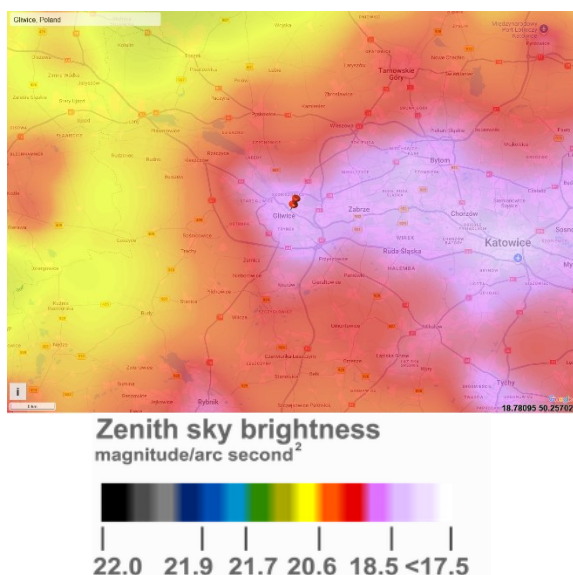
Celem badań jest opracowanie wieloparametrycznego podejścia do analizy czynników wpływających na powstawanie łuny świetlnej (ang. *skyglow*) poprzez integrację danych satelitarnych, atmosferycznych oraz obserwacji obywatelskich. W przeciwieństwie do większości dotychczasowych badań, koncentrujących się na pojedynczych parametrach środowiskowych, w niniejszej pracy przyjęto podejście wieloczynnikowe, uwzględniające zarówno czynniki antropogeniczne, jak i meteorologiczne oraz atmosferyczne [13, 16].

Przyjęto założenie, że intensywność łuny świetlnej jest funkcją złożonych interakcji pomiędzy emisją sztucznego światła, warunkami atmosferycznymi, strukturą pionową atmosfery oraz właściwościami powierzchni Ziemi [12, 21]. W ramach badań zaproponowano koncepcję wskaźnika *Sky Glow Index (SGI)* (rys. 1) integrującego dane pochodzące z wielu źródeł obserwacyjnych.

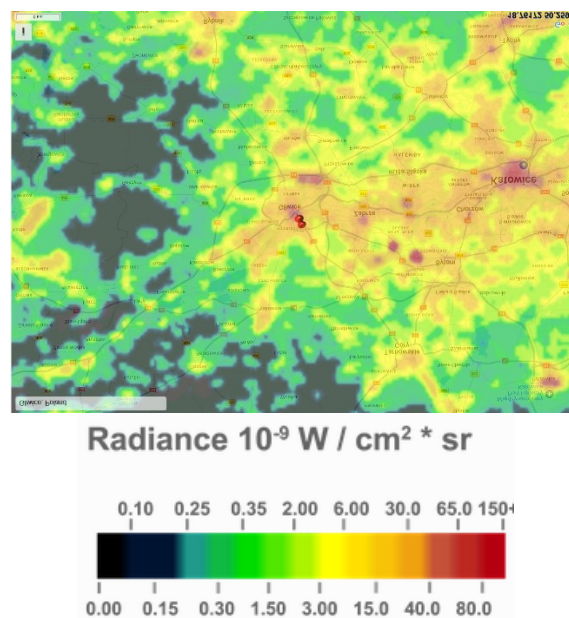


Rys. 1 Składowe wskaźnika Sky Glow Index (SGI) wraz ze źródłem danych (podanym w nawiasie).

Jako obszar referencyjny przyjęto teren Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii, stanowiący jeden z największych i najbardziej zurbanizowanych obszarów Europy Środkowej. Region ten charakteryzuje się dużą gęstością zaludnienia, znaczną koncentracją przemysłu oraz wysokim poziomem emisji sztucznego światła [14].



Rys. 2 Jasność nieba. Źródło: [14]



Rys. 3 Ilość światła emitowanego z powierzchni ziemi. Źródło: [14]

Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolia obejmuje obszar zamieszkiwany przez ponad 2 mln mieszkańców i stanowi dogodne środowisko do analiz wpływu urbanizacji na jasność nocnego nieba. Dotychczasowe pomiary wskazują, że średnia jasność

nocnego nieba w centrum aglomeracji osiąga wartości ok. 18,7 mag/arcsec², co odpowiada wysokiemu poziomowi zanieczyszczenia światłem [2, 3] (rys. 2, rys. 3).

2.1. Dane

Dane programu Copernicus

Podstawowym źródłem danych środowiskowych wykorzystanych w badaniach były dane pochodzące z programu Copernicus, będącego największym europejskim systemem obserwacji Ziemi [6]. Program ten dostarcza danych satelitarnych oraz umożliwiających monitorowanie procesów zachodzących w atmosferze, hydrosferze i biosferze.

W niniejszej pracy wykorzystano przede wszystkim dane pochodzące z usługi Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), umożliwiającej analizę składu chemicznego atmosfery oraz parametrów meteorologicznych istotnych z punktu widzenia modelowania łuny świetlnej [6].

Wybrano powierzchniowe parametry środowiskowe, ponieważ bezpośrednio wpływają na rozpraszanie i absorpcję światła, przezroczystość atmosfery oraz współczynnik odbicia powierzchni (albedo), które w istotny sposób determinują intensywność łuny świetlnej [11, 20, 21].

Dodatkowo uwzględniono pionową strukturę atmosfery, analizując parametry dla poziomów ciśnienia 1000 hPa, 925 hPa oraz 850 hPa. Badanie łuny świetlnej z wykorzystaniem danych CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) jest niezwykle istotne nie tylko na poziomie 1000 hPa (ciśnienie przy powierzchni Ziemi lub poziomie morza), ale również na poziomach 925 hPa i 850 hPa (dolna troposfera), ponieważ aerozole oraz zanieczyszczenie światłem nie są ograniczone wyłącznie do powierzchni Ziemi. Uwzględnienie wielowarstwowej struktury atmosfery pozwala na analizę wpływu transportu aerozoli na propagację łuny świetlnej na znaczne odległości [18]. Globalny model ECMWF/CAMS standardowo wykorzystuje system 137 hybrydowych poziomów pionowych. Jednak analizowane dane operują na specyficznej siatce pionowej składającej się z 60 poziomów. Poziomy 55–60 reprezentują absolutnie kluczową, najniższą część atmosfery, czyli warstwę przyziemną. Poziom 60 odpowiada bezpośrednio powierzchni Ziemi.

W przeciwieństwie do poziomów ciśnieniowych, poziomy te odzwierciedlają rzeczywistą warstwę powietrza znajdującą się tuż nad powierzchnią terenu, zarówno na obszarach nizinnych, jak i górskich. Sztuczne światło emitowane przez miasta w pierwszej kolejności trafia do najniższych warstw atmosfery. Analiza tych poziomów umożliwia precyzyjne określenie koncentracji oraz rodzaju aerozoli dokładnie w miejscu, gdzie emisja światła i pierwotne procesy jego rozpraszania są najsilniejsze. [18]

W analizie uwzględniono różne typy aerozoli atmosferycznych, ponieważ ich właściwości optyczne i skład chemiczny wpływają na procesy rozpraszania promieniowania świetlnego. W szczególności analizowano aerozole pyłowe, siarczanowe, organiczne oraz pochodzące ze spalania biomasy, zgodnie ze współczesnymi klasyfikacjami aerozoli opracowanymi na podstawie wieloletnich obserwacji sieci AERONET [19].

Dane VIIRS

Dane dotyczące emisji światła nocnego pozyskano z instrumentu *Cisibile Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)*, znajdującego się na satelitach Suomi-NPP oraz NOAA-20 [17]. Dane VIIRS/Night Band umożliwiają analizę przestrzennego rozkładu emisji światła antropogenicznego z rozdzielczością przestrzenną ok. 500 m (rys. 4).

Dane VIIRS wykorzystano do określenia przestrzennego rozkładu źródeł światła, analizy zmian intensywności oświetlenia, kalibracji wskaźnika SGI oraz identyfikacji głównych emiterów światła.



Rys. 4. Przykładowa mapa jasności sztucznego światła nocnego dla zadanego obszaru zarejestrowana przez VIIRS Day/Night Band. Źródło [17].

Obserwacje obywatelskie Globe at Night

Program Globe at Night umożliwia gromadzenie informacji dotyczących jakości nocnego nieba na podstawie obserwacji prowadzonych przez wolontariuszy na całym świecie [9]. W analizie uwzględniono lokalizację obserwacji, datę i czas pomiaru, szacowaną jasność nieba oraz odpowiadającą jej klasę skali Bortle'a.

Wykorzystanie tych danych pozwala na znaczące zwiększenie liczby punktów obserwacyjnych oraz umożliwia częściową walidację wyników modelowania satelitarnego [16].

Wskaźnik Sky Glow Index (SGI)

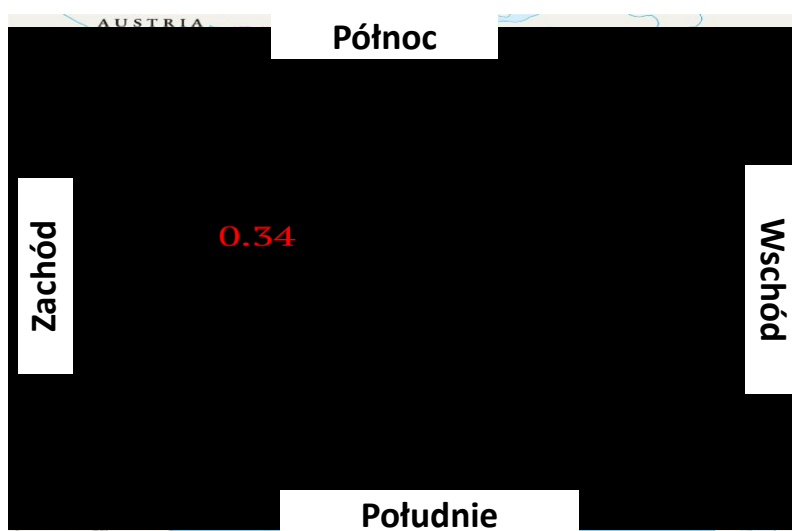


Rys. 5 Wybrane parametry wpływające na łunę świetlną.

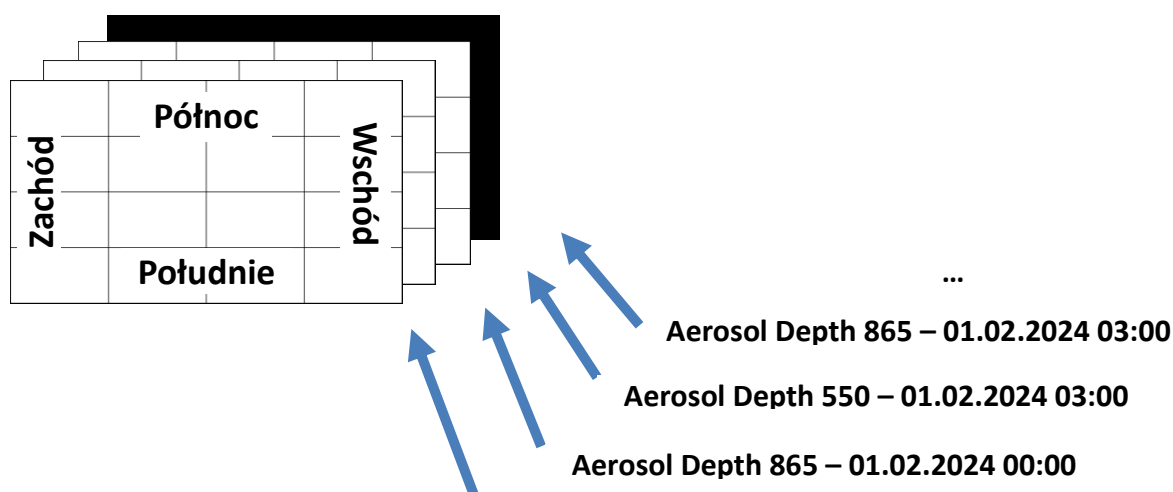
W celu integracji danych pochodzących z różnych źródeł zaproponowano wskaźnik Sky Glow Index (SGI) (rys. 6). Wskaźnik ten stanowi funkcję ważoną parametrów opisujących warunki atmosferyczne, emisję światła oraz czynniki środowiskowe.

Czynniki antropogeniczne, takie jak intensywność emisji światła, stopień urbanizacji, gęstość zaludnienia oraz natężenie ruchu drogowego, które w ostatnich latach staje się coraz bardziej istotnym źródłem zanieczyszczenia światłem ze względu na dynamiczny rozwój technologii oświetlenia pojazdów [1] również zostały w niniejszej pracy wzięte pod uwagę.

Zastosowanie wskaźnika Sky Glow Index umożliwia kompleksową analizę łuny świetlnej oraz identyfikację dominujących czynników wpływających na jasność nocnego nieba [11, 16]. Przykładowe zobrazowanie danych i ich struktury dla Chorwacji przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 7. Trójwymiarowa macierz na podstawie danych CAMS – Aerosol Depth 550 - 01.02.2024 00:00.



Rys. 6. Trójwymiarowe dane aerozolowe, zorganizowane w postaci trójwymiarowej siatki, łączącej 60 poziomów modelowych z globalnym pokryciem przestrzennym.

3. Wyniki i dyskusja

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz dostępnych źródeł danych wykazano, że dotychczasowe badania nad łuną świetlną koncentrowały się głównie na pojedynczych grupach czynników, takich jak emisja sztucznego światła, stężenie aerozoli atmosferycznych lub zachmurzenie [12, 20, 21]. Jednocześnie nie zidentyfikowano prac, w których uwzględniono by jednocześnie pełny zestaw czynników atmosferycznych, środowiskowych i antropogenicznych wpływających na powstawanie łuny świetlnej. Przedstawiona koncepcja badawcza zakłada integrację danych pochodzących z wielu źródeł obserwacyjnych i modelowych, co umożliwia budowę kompleksowego modelu opisującego procesy odpowiedzialne za powstawanie łuny świetlnej. Szczególną rolę odgrywa tutaj automatyzacja procesu pozyskiwania, przetwarzania i integracji danych pochodzących z systemów satelitarnych, modeli atmosferycznych oraz obserwacji obywatelskich.

W niniejszej pracy dokonano wyboru trzech głównych grup czynników wpływających na intensywność łuny świetlnej: czynniki antropogeniczne, atmosferyczne i środowiskowe. W przeciwieństwie do większości dotychczasowych badań, proponowane podejście zakłada jednoczesną analizę wszystkich wymienionych czynników, co może umożliwić uzyskanie bardziej wiarygodnego modelu łuny świetlnej. W większości dotychczasowych badań nad łuną świetlną nie uwzględniano parametrów czasowych emisji światła, takich jak migotanie źródeł LED (ang. *light flicker*), mimo że wykazano ich potencjalny wpływ na organizmy żywe oraz funkcjonowanie ekosystemów [10]. W przyszłości parametr ten może zostać włączony do automatycznego modelu Sky Glow Index.

Jednym z najważniejszych aspektów proponowanego rozwiązania jest możliwość pełnej automatyzacji procesu monitoringu zanieczyszczenia światłem. Wykorzystanie otwartych danych satelitarnych programu Copernicus, produktów CAMS, danych VIIRS oraz obserwacji Globe at Night pozwala na budowę systemu działającego w trybie ciągłym [7, 9, 17]. Takie podejście wpisuje się w rozwój inteligentnych systemów monitorowania środowiska oraz koncepcji cyfrowych bliźniaków środowiskowych (ang. *Environmental Digital Twins*), rozwijanych obecnie w ramach programu Destination Earth [7]. Proponowany Sky Glow Index może stanowić pierwszy krok w kierunku budowy globalnego, zautomatyzowanego systemu monitoringu i predykcji łuny świetlnej.

Praca finansowana z 02/050/BK26/0058 oraz 02/050/BKM26/0063.

LITERATURA

1. Bara S.: On the continued growth of light pollution from vehicle lights (2016-2025) (Version v1). Zenodo, 2025.
2. Batin F.F., et al.: Bortle scale: A way to assess and monitor the urban nightsky. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 2021, Vol.19, No.5, p.88-95.
3. Bortle, J.E.: Gauging light pollution: The Bortle Dark-Sky Scale. *Sky & Telescope*, 2001.

4. Commission Internationale de l'Eclairage (CIE): CIE S 017:2020 ILV: International Lighting Vocabulary (2nd ed.), Vienna 2020, CIE.
5. Conti S.: Artificial light at night as a dynamic signal of human activity. *Nature Sensors*, 2026, Vol.1, No.380.
6. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS): Global atmospheric composition products. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2025.
7. Copernicus Programme: Copernicus Earth Observation Programme. European Commission, 2025.
8. DarkSky International: Artificial Light at Night: State of the Science 2025. Zenodo, 2025.
9. Globe at Night: Night Sky Brightness Observations, 2025.
10. Inger, R., Bennie J., Davies T.W., Gaston K.J.: Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. *PLoS ONE*, 2014. Vol.9, No.5, e98631.
11. Kocifaj M., Barentine J.C.: Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. *Scientific Reports*, 2021, Vol.11, No.15650.
12. Kocifaj M., Komar L.: A role of aerosol particles in forming urban skyglow and skyglow from distant cities. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, Vol.458, No.1, p.438-448.
13. Kocifaj M., Wallner S., Barentine J.C.: Measuring and monitoring light pollution: Current approaches and challenges. *Science*, 2023, Vol.380, No.6650, p.1121-1124.
14. Light Pollution Map: Global Light Pollution Maps and Statistics, 2025.
15. Machnowska A.A., Skwarło-Sońta K.: Artificial Light at Night (ALAN), an Anthropogenic Pollutant: A Narrative Review. *Pollutants*, 2026, Vol.6, No.1, p.11.
16. Mander S., et al.: How to measure light pollution – A systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*, 2023, Vol.92, No.104465.
17. NASA EarthData: Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), 2025.
18. Rogozovsky I., et al.: Unveiling atmospheric layers: Vertical pollution patterns and prospects for high-resolution aerosol retrievals using the Eastern Mediterranean as a case study. *Environmental Science & Technology*, 2025, Vol.59, No.24, p.12181-12195.
19. Sai Krishnaveni A., et al.: Advancing global aerosol classification: Source-compositional typology and variability from 30 years (1993-2024) of AERONET observations. *Science of the Total Environment*, 2025, Vol.1007.
20. Ścieżor T., Czaplicka A.: The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, Vol.254.
21. Wallner S., Kocifaj M.: Aerosol impact on light pollution in cities and their environment. *Journal of Environmental Management*, 2023, Vol.335.