
Ocalmy noc

Let's save the night

Andrzej Z. Kotarba*

Centrum Badań Kosmicznych PAN

Abstrakt. Światło jest niezbędne do życia nie mniej, niż jego brak. Nadmiar światła w środowisku nocnym powoduje zaburzenia naturalnych cykli życiowych roślin i zwierząt, w tym ludzi. Problem jest na tyle poważny, że współcześnie mówi się już wprost o zanieczyszczeniu światłem. W tekście przybliżam ten problem i pokazuję, jak narzędzia fizyki pomagają w jego monitorowaniu.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie światłem, jasność nocnego nieba, obserwacje satelitarne, radiancja, luminancja

Abstract. Light is essential for life. But just as much their absence. Excessive light in the nighttime environment disrupts the natural life cycles of plants and animals, including humans. The problem has become known as light pollution. In this article, I will take a closer look at this issue and show how the tools of physics contribute to monitoring it.

Key words: light pollution, night sky brightness, satellite observations, radiance, luminance

Z całego spektrum fal elektromagnetycznych zakres 380-780 nm ma dla ludzi szczególne znaczenie. Na fotony z tego przedziału, potocznie nazywanego światłem, uczulone są fotoreceptory naszych oczu. Dzięki nim widzimy, a zmysł wzroku zapewnia nam około 80% informacji o otoczeniu. Światło ma też ogromne znaczenie w fizjologii. Jest podstawowym sygnałem (tzw. dawcą czasu) w synchronizacji naszego wewnętrznego zegara biologicznego ze środowiskiem zewnętrznym – procesie, w którym człowiek ostatnio bardzo „namieszał”.

Impuls świetlny poprzez receptory w siatkówce oka trafia do systemu nerwowego i jest transmitowany do mózgu. Ten steruje gospodarką hormonalną organizmu, ustawiając go bądź to w trybie aktywności (dzień), bądź odpoczynku (noc). Kluczowa jest rola melatoniny zwanej hormonem ciemności, produkowanej wyłącznie w warunkach mroku. Gdyby światło było dostępne tylko za dnia, produkcja melatoniny mogłaby się prawidłowo rozpoczynać z nastaniem zmroku. Tak się jednak nie dzieje, gdyż nawet po zachodzie Słońca wciąż jesteśmy otoczeni światłem – sztucznym.

Precyzyjnie zsynchronizowane cykle fizjologiczne ulegają więc zaburzeniu. U wielu osób pojawiają się problemy z zasypianiem, jakością snu, bezsennością. W ciągu dnia jesteśmy zdekoncentrowani, w kiepskim nastroju, co z czasem zamienia się w depresję. Pojawiają się problemy z metabolizmem, stopniowo prowadzące do otyłości czy chorób układu krążenia. Z jeszcze więk-

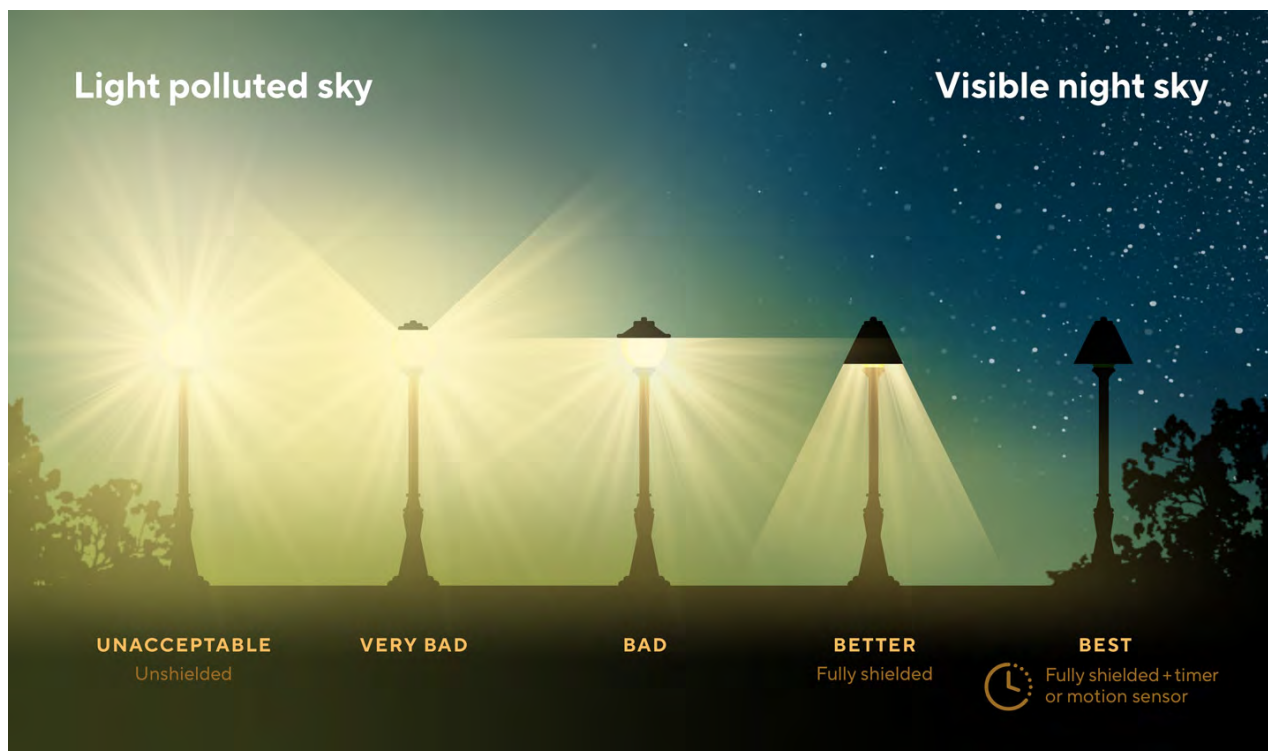
szymi problemami borykają się rośliny i zwierzęta, również oczekujące cyklu dnia i nocy – teraz drastycznie zaburzonego przez obecność antropogenicznego światła po zachodzie Słońca.

W naukach przyrodniczych nadmiar światła nocą uznaje się za rodzaj zanieczyszczenia środowiska. W ścisłej definicji jest to sytuacja, gdy organizmy są ekspozowane na światło o niewłaściwym natężeniu i barwie, o niewłaściwej porze i w niewłaściwym miejscu. Przy takim podejściu za zanieczyszczenie wypadaloby uznać nawet jeden antropogeniczny foton. Pragmatycznie przyjmuje się więc, że zanieczyszczenie światłem to niezamierzony rezultat oświetlenia elektrycznego czy też nadmiar sztucznego światła, spowodowany np. nieprawidłowo zaprojektowanym oświetleniem (ryc. 1).

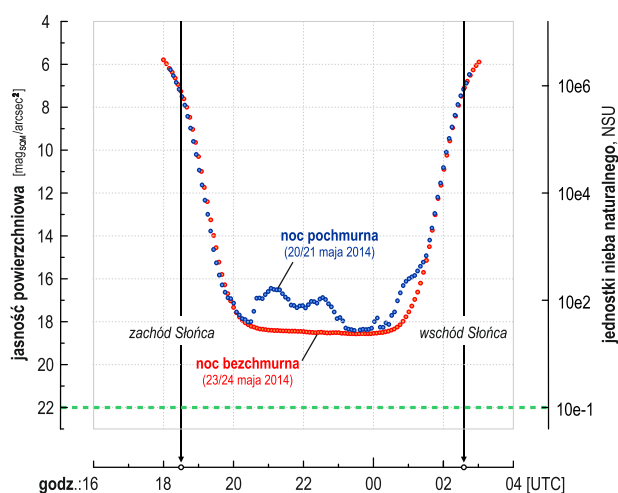
I tu przyrodnicy stawiają sobie pytanie: ile tego sztucznego światła jest wokół nas? Z jak intensywnym zanieczyszczeniem świetlnym mamy do czynienia? Odpowiedzi szukamy czerpiąc garściami z metod badawczych i technik obserwacyjnych od dawna znanych w fizyce, w szczególności powszechnie stosowanych w astronomii, geofizyce (fizyce atmosfery) czy teledetekcji.

Zacznę od astronomii, bo to astronomowie jako pierwsi zaalarmowali, że z nocą dzieje się coś niedobrego. Zainteresowani obserwacją ciemnego nieba coraz dobitniej doświadczała jego wyjaśnienia (ryc. 2). Było oczywiście, że za niepożądaną zmianą stoi dynamiczny rozwój miast i błyskawiczne zmniejszenie się dystansu między rozświetlonymi aglomeracjami a wymagającymi mroku obserwatoriami.

*ORCID: 0000-0001-7982-1992



Rys. 1. Lampa uliczna to jedno ze źródeł oświetlenia, które może powodować zanieczyszczenia światłem. Wiele zależy od kwestii technicznych, w tym sposobu emisji światła z oprawy. Najgorsza sytuacja to tzw. „szklana kula”, czyli oprawa, która emituje światło dookoła, z taką samą intensywnością (pierwsza lampa po lewej). Sytuacja najlepsza (druga lampa z prawej) to oprawa, która kieruje światło w dół i zapobiega niepotrzebnej emisji światła na boki czy w górę, np. na fasady budynków, czy na tereny zielone. Idealnie byłoby, gdyby tak zaprojektowana lampa była użytkowana tylko wtedy, gdy ma komu służyć, tj. wyłączała się automatycznie, gdy nie ma pieszych i ponownie włączała np. za pomocą czujnika ruchu (pierwsza lampa po prawej) (źródło: darksky.org)



Rys. 2. Przykład zmiany jasności nocnego nieba określanej za pomocą półprofesjonalnego fotometru SQM (*sky quality meter*) w Warszawie, w maju 2014 roku. Kolorem czerwonym zaznaczone są wartości dla nocy bezchmurnej. W warunkach nieba naturalnego wartości te powinny spadać do poziomu $22 \text{ magn}_{\text{SQM}} \cdot \text{arcsec}^{-2}$. Zanieczyszczenie światłem powoduje, że tak się nie dzieje. Kolor niebieski to pomiar w warunkach nocy z chmurami. Obecność chmur w warunkach zanieczyszczenia światłem zwiększa jasność nieba nawet kilkadziesiąt razy. Jednostki nieba naturalnego (skala po prawej) wskazują, ile razy niebo aktualne jest jaśniejsze od nieba wolnego od zanieczyszczenia światłem

By lepiej zbadać problem, podjęto próby modelowania jasności nieba (lata 60. XX w.). Jak na dzisiejsze standardy, pierwsze modele były dość trywialne. Jasność

nieba była w nich proporcjonalna do odległości od miasta. Z racji braku danych o intensywności miejskich świateł, „moc świecenia” metropolii przybliżano wskaźnikami ekonomicznymi i liczbą mieszkańców (ludne i bogate miasto świeciło bardziej, niż mała i biedna wioska). Geometrię trójwymiarowego miasta zredukowano do punktu.

Przy takich założeniach powstał pionierski model Merle’a F. Walkera z 1970 roku [1]. Szybko został on jednak dopracowany przez Richarda L. Berry’ego [2], który wprowadził pierwsze elementy fizyki atmosfery. Berry uzależnił jasność nieba od współczynników rozproszenia i ekstynkcji promieniowania. Pozwolił również wchodzić światłu w interakcje z aerozolami, przy czym w atmosferze mogła znajdować się tylko jedna ich warstwa. Model samej atmosfery pozostawał prymitywny i to do tego stopnia, że jej gęstość malała liniowo z wysokością.

Istotnym krokiem do przodu okazały się prace Roya Henry’ego Garstanga [3, 4]. Ów brytyjski astrofizyk zaproponował model, który znacząco „ufizycznił” obraz nocnego świata. U Garstanga gęstość gazów zmieniała się już wykładniczo, a aerozole mogły występować w kilku warstwach i mieć różną grubość optyczną. Jasność nieba mogła być liczona w dowolnym punkcie nieboskłonu (nie tylko w zenicie), na dowolnej wysokości nad poziomo-

mem morza. Otrzymywano wyniki y dla popularnych w astronomii zakresów fotometrycznych V i B .¹

Zmienił się też sposób postrzegania miast. Z punktów rozrosły się do świecących dysków, a co najważniejsze model Garnstanga pozwalał na anizotropowy rozkład *funkcji kierunkowej emisji światła* – miasta mogły świecić z różną intensywności w różnych kierunkach.

Z takim modelem jasności nieba astronomowie wkroczyli w XXI w. – stulecie, w którym już nawet proste komputery PC pozwalały na zadowalające symulacje numeryczne. Z dobrodziejstw tych szybko skorzystali włoscy naukowcy, Pierantonio Cinzano i Fabio Falchi. Sięgnęli po model Garnstanga i przenieśli go na grunt współczesnych metod numerycznych [5].

Skupili się na problemie transferu promieniowania, w zakresie od 250 nm do podczerwieni, uproszczonym do śledzenia promieni (*ray-tracing*). Użytkownik modelu Cinzana i Falchiego zyskał możliwość uwzględnienia własnej atmosfery z maksymalnie pięcioma warstwami chmur i aerozoli. Mógł też zdefiniować funkcję kierunkowej emisji światła dla każdego osobnego piksela, a nie jak dotąd jedną uniwersalną dla całego badanego obszaru.

Co ważne, opis fizyczności świata wsparły wcześniej niedostępne obserwacje satelitarne. Dostarczyły one szczegółowej informacji o topografii (model SRTM) oraz danych o albedo² powierzchni lądów (obserwacje MODIS). Jednak największym przełomem było uwzględnienie empirycznych danych na temat intensywności i lokalizacji nocnych światel. Miasta przestały być geometrycznymi abstrakcjami – dzięki użyciu danych satelitarnych z instrumentu OLS model Cinzana i Falchiego jako pierwszy został zasilony rzeczywistymi mapami nocnych światel naszej planety.

Na efekty nie trzeba było długo czekać. W 2001 roku ukazała się publikacja przynosząca pierwszy w historii atlas sztucznego rozjaśnienia nieboskłonu na całej planecie [6]. 15 lat później atlas doczekał się kolejnej edycji, tym razem zasilonej danymi satelitarnymi instrumentu VIIRS i walidowany pomiarami fotometrycznymi [7]. Okazało się, że w 2015 roku niebo zanieczyszczone światłem miało nad sobą 80% ludności świata i ponad 99% mieszkańców i mieszkańek Europy i USA. Naturalnie ciemne niebo nie występowało niemal na jednej czwartej

(23%) lądów między 75°N i 60°S szerokości geograficznej i aż nad 88% terytorium Europy.

Model Cinzana i Falchiego pozostaje najpopularniejszym narzędziem do kartowania³ zanieczyszczenia światłem w skali całego globu. Coroczna aktualizacja map wykonywana jest np. przez Davida Lorenza z Uniwersytetu Wisconsin w Madison. Sięgnąłem po jedną z jego map (dla roku 2022), by ocenić, jaki jest stopień zanieczyszczenia świetlnego nocnego nieba nad Polską (ryc. 3). Dane pokazały, że w 2022 roku nocne niebo nad naszym krajem było średnio 147% jaśniejsze, niż niebo wolne od zanieczyszczenia światłem (za takie przyjmuje się nieboskłon o jasności powierzchniowej⁴ 22,0 mag · arcsec⁻², co odpowiada w przybliżeniu luminancji równiej 174 μcd · m⁻²). Najbliższe naturalnemu wystąpiło w Bieszczadach, gdzie było tylko o 6-8% jaśniejsze, niż niebo referencyjne. Niestety oznacza to jednocześnie, że nieba wolnego od zanieczyszczenia światłem w Polsce nie ma już wcale.

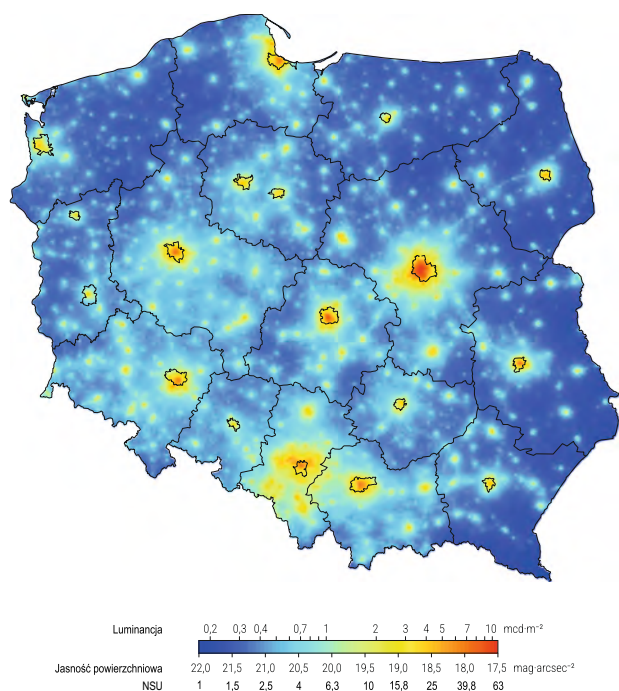
Mieszkańcy największych miast o niebie „nocnym” w zasadzie mogą tylko pomarzyć. Nieboskłon prosto nad ich głowami (zenit) jest ponad 1000% jaśniejszy, niż niebo naturalne. Najjaśniej jest w centrum stolicy, gdzie niebo zostało sztucznie rozświetlone do 17,46 mag · arcsec⁻² (11,2 μcd · m⁻²), tj. do wartości 6329% większej, niż rejestrowana dla nieba wolnego od skażenia światłem. W takich warunkach fazy Księżyca przestają już mieć znaczenie: zawsze jest jaśniej, niż w czasie pełni. Drogi Mlecznej nie dostrzeżemy nad 9% powierzchni Polski. To obszar zamieszkały przez 58% Polek i Polaków. Sytuacja jest najgorsza w województwie śląskim, gdzie obrazu Galaktyki na nocnym niebie nie może zobaczyć aż 89% populacji (72% w województwie mazowieckim, 63% w pomorskim). Dla co piątego Polaka i Polki nocne niebo jest tak jasne, że ich oczy nie przełączają się z dzien-

1. Jednym z najczęściej stosowanych w astronomii jest zestaw filtrów *UBV* Johnsona. Pozwala on na obserwacje w trzech różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego: *U* – ultrafioletowym, *B* – niebieskim i *V* – widzialnym (przyp. red.).

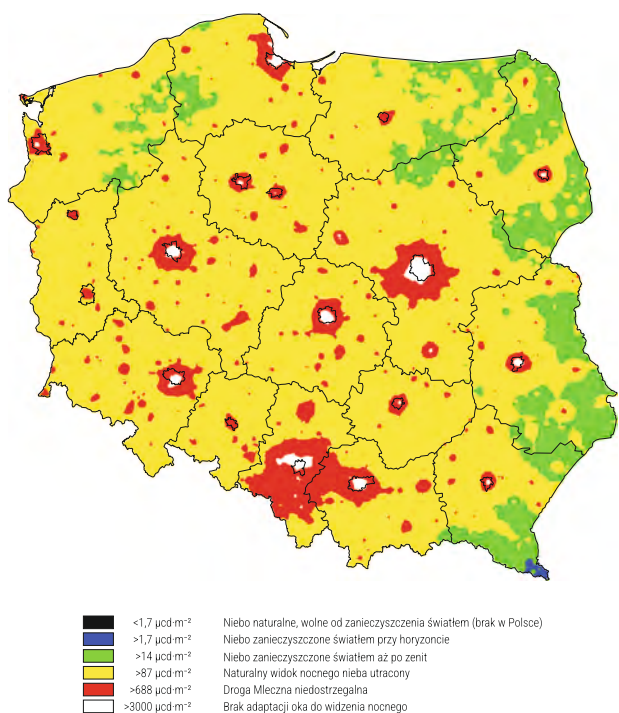
2. Albedo (łac. *białość*) – parametr fotometryczny określający zdolność odbijania światła przez daną powierzchnię. Współczynnik albedo jest równy stosunkowi ilości promieniowania odbitego do ilości promieniowania padającego. Pojęcie to do fizyki wprowadził Johann Heinrich Lambert (przyp. red.).

3. Kartowanie – nanoszenie na podkład mapy topograficznej szczegółów dotyczących wybranego tematu, na podstawie bezpośrednich obserwacji i pomiarów w terenie (przyp. red.).

4. Jasność powierzchniowa nieba S_a podawana jest najczęściej w powszechnie używanych w astronomii jednostkach *magnitudo na sekundę łuku do kwadratu* (mag/arcsec²). Jest to skala pochodna względem skali jasności gwiazdowej magnitudo (mag, ^m), określającej wizualne wrażenie jasności gwiazdy jako źródła punktowego. Skala magnitudo jest skalą logarytmiczną, względną i odwrotną, w której obiekt o jasności 0 mag jest jaśniejszy 100 razy od obiektu o jasności 5 mag. Skala mag/arcsec² określa jasność powierzchniową obiektów astronomicznych rozciągłych, takich jak mgławice, galaktyki, komety czy właśnie tło nieba. Jednostką jasności powierzchniowej w układzie SI jest *kandela na metr kwadratowy* (cd/m²). Zależność pomiędzy tymi wielkościami opisuje następujący wzór: cd/m² = 10,8 · 10⁴ · 10^(-0,4 · [mag/arcsec²]). W związku z niską jasnością powierzchniową nocnego nieba stosowane są jednostki pochodne: milikandela na metr kwadratowy (mcd/m²), mikrokandela na metr kwadratowy μcd/m² (przyp. red.).



Rys. 3. Jasność nocnego nieba nad Polską w 2022 roku na podstawie obserwacji VIIRS i modelu Cinzana i Falchiego (dane źródłowe udostępnione przez Davida Lorenza z Uniwersytetu Wisconsin w Madison). Jasność wyrażona w wartościach jasności powierzchniowej (zakres fotometryczny V) i przybliżona do wartości luminancji oraz jednostek nieba naturalnego (NSU, *night sky unit*, wielokrotności jasności nieba aktualnego względem referencyjnego, tj. wolnego od zanieczyszczenia światłem)



Rys. 4. Jasność nocnego nieba nad Polską w 2022 roku na podstawie obserwacji VIIRS i modelu Cinzana i Falchiego (dane źródłowe udostępnione przez Davida Lorenza z Uniwersytetu Wisconsin w Madison). Jasność podzielona wg stopnia antropogenicznego wyjaśnienia nieba na klasy przyjęte przez Falchiego i in. (2016) w globalnym atlasie jasności nieba

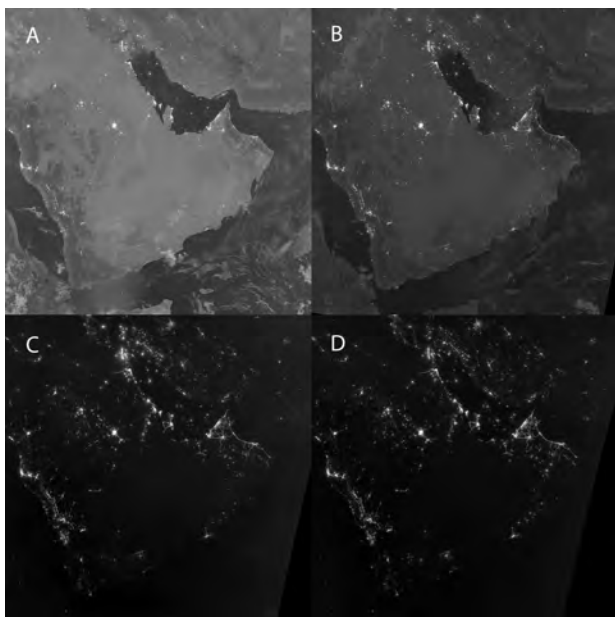
nego (fotopowego) na nocny (skotopowy) tryb widzenia (ryc. 4). W Warszawie, Krakowie, Łodzi, Poznaniu, Lublinie, Gdańsku zmierzch od razu przechodzi w świt.

Sukces modelu Cinzana i Falchiego nie byłby możliwy, lub nie byłby tak spektakularny, gdyby nie obserwacje satelitarne. Bez nich wciąż musieliśmy przyjmować mniej lub bardziej abstrakcyjne przybliżenia jasności światła uwarunkowane wskaźnikami demograficznymi. Wspomniałem wcześniej o dwóch instrumentach OLS i VIIRS. To ważne narzędzia obserwacyjne. Chciałbym poświęcić im nieco więcej uwagi.

OLS (*Operational Linescan System*) był dzieckiem amerykańskiej armii. Gdy w latach 60. XX. Amerykanie próbowali fotografować z orbity okołozemskiej terytorium ZSRR i jego sojuszników, okazało się, że spora liczba zdjęć przedstawia chmury. Potrzebowali narzędzia, które pozwoliłoby z wyprzedzeniem ocenić sytuację meteorologiczną nad miejscem obserwacji, by mogli efektywniej wykorzystać możliwości satelitów szpiegowskich. Rozwiązaniem okazał się *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) oraz jego „oczy”, tj. instrument OLS, którego sensorem był radiometr obrazujący w dwóch zakresach promieniowania. Jeden kanał pokrywał zakres 10,0-13,4 μm , fale powszechnie stosowane w meteorologii do określania temperatury radiacyjnej chmur – tak za dnia, jak i w nocy (rejestrowane jest promieniowanie własne Ziemi). Drugi kanał przypadł na szeroki zakres od 0,47 do 0,95 μm , czyli promieniowanie widzialne i bliską podczerwień. Obrazy teoretycznie można byłoby uzyskiwać jedynie w ciągu dnia (odbite od Ziemi promieniowanie Słońca), ponieważ Ziemia nie emituje promieniowania w tym zakresie. Wojskowi byli jednak ambitni. Stwierdzili, że Księżyc w czasie pełni na tyle jasno oświetla chmury, że na orbitę powinno docierać wystarczająco dużo światła, by dało się je rejestrować (ryc. 5). Potrzebny był tylko wystarczająco czuły instrument. W OLS zainstalowano zatem fotopowielacz, który w sposób dynamiczny wzmacniał słabe nocne światła planety. Dynamiczny oznacza tu, że stopień wzmocnienia był wyliczany na bieżąco („w locie”), w efekcie czego wojskowi otrzymywali poprawnie naświetlone obrazy zarówno dziennej, jak i nocnej strony Ziemi.

Pierwszy OLS wysłano w kosmos w 1976 roku. Naukowcy od razu dostrzegli potencjał zbieranych danych widząc, że na zdjęciach wyraźnie zaznaczają się światła generowane przez człowieka, np. miasta, obszary eksploatacji ropy. Na szeroką skalę mogli skorzystać z dobrodziejstw OLS jednak dopiero po 1992 roku, gdy amerykańskie wojsko stworzyło cyfrowe archiwum danych DMSP w obrębie cywilnej agencji meteorologicznej (NOAA). Od razu ruszyły prace, które ostatecznie zaowocowały mapami wykorzystanymi w pierwszym atlasie jasności nieba z 2001 roku.

OLS szybko ujawnił swoje ograniczenia. To, co wystarczyło wojskowym meteorologom, niekoniecznie było optymalne dla cywilnych zastosowań. Największą bo-



Rys. 5. Półwysep Arabski obserwowany instrumentem VIIRS w różnych fazach Księżyca: a) 30.09.2012, pełnia; b) 5.10.2012, tarcza Księżyca oświetlona w 75%; c) 10.10.2012, tarcza Księżyca oświetlona w 29%; d) 15.10.2012, nów (fot. NASA).

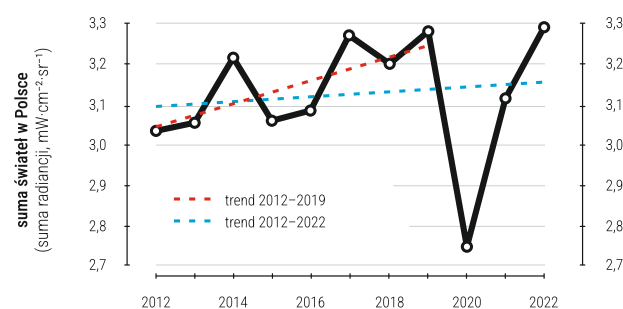
łącką okazał się charakter samych danych. Radiometry satelitarne przesyłają zazwyczaj informacje o radiancji⁵ promieniowania. Natomiast OLS przekazywał obrazy, w których każdy piksel charakteryzowała bezwymiarowa wartość z zakresu od 0 do 63. Dynamiczne wzmacnianie sygnału powodowało, że już na poziomie pomiaru tracono oryginalną informację o radiancji. Jej odtworzenie było piekielnie trudne i wykonalne jedynie w szczególnie sprzyjających okolicznościach [8, 9].

To i inne ograniczenia przezwyciężono projektując następcę OLS, skaner VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) dla satelitów meteorologicznych nowej generacji [10, 11]. VIIRS jest już pełnowymiarowym radiometrem, kalibrowanym non stop na orbicie. Przesyła informacje o radiancji promieniowania, będąc przy tym niemal trzy razy bardziej czuły, niż poprzednik (limit detekcji dla VIIRS to około $2 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$). Zakres dynamiczny VIIRS dobrano tak szeroko (od $3 \cdot 10^{-10}$ do $2 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), że wyeliminowany został dość irytujący w OLS problem saturacji sygnału, tj. notorycznego prześwietlenia obszarów miejskich. Pierwszy VIIRS trafił na orbitę w 2012 roku na pokładzie należącego do NASA satelity Suomi-NPP. Od tego czasu dostarcza danych dla każdego miejsca na świecie dwa razy na dobę: raz w ciągu dnia, raz w ciągu nocy.

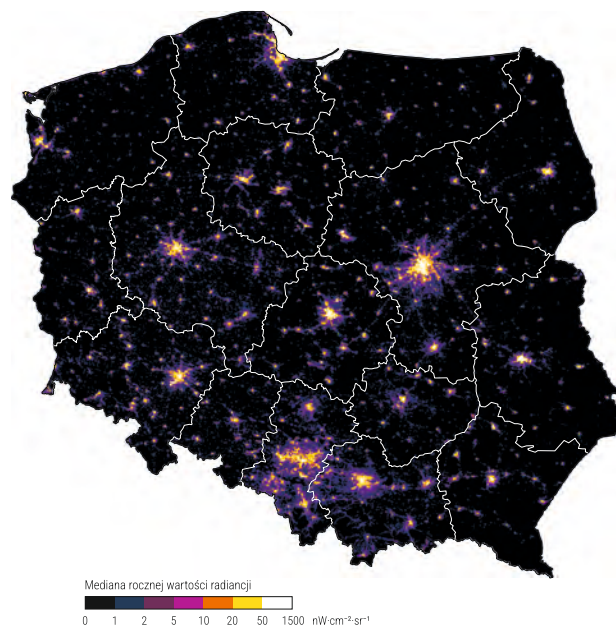
Sięgnąłem do archiwum tych obserwacji, by sprawdzić, co VIIRS ma do powiedzenia o radiancji nocnych

5. Radiancja (termin radiometryczny) – strumień promieniowania na jednostkę powierzchni na jednostkę kąta bryłowego. W układzie SI jednostką radiancji jest wat na steradian na metr kwadratowy ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) (przyp. red.).

światel w Polsce, a co za tym idzie, o zanieczyszczeniu światłem. Ciekawe rzeczy widać już w największym stopniu uogólnienia, tj. w wartości sumy radiancji w obrębie terytorium kraju, popularnie nazywanej „sumą światel” (ryc. 6). W roku 2022 wyniosła ona $3\,290\,590 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, będąc nieznacznie większą od wartości notowanych w latach 2017 i 2019. Tym samym była o 6% większa niż przeciętna suma światel w dekadzie 2012-2021 oraz aż o 20% większa niż w roku 2020 (podczas pandemii, gdy wielu wódatarzy decydowało się w czasie kwarantanny wyłączyć część nocnego oświetlenia w gminach).

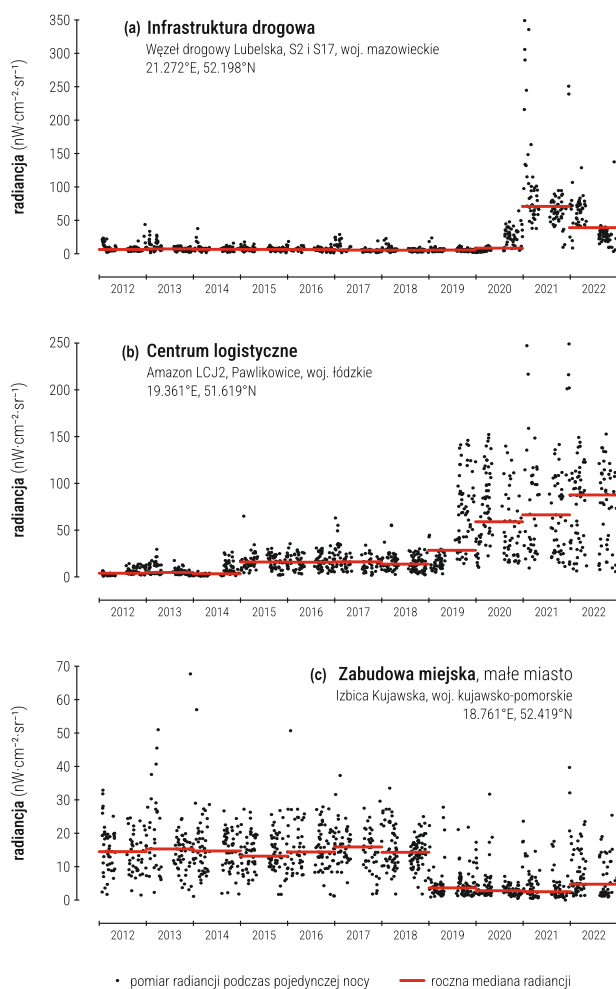


Rys. 6. Wieloletnia zmienność sumy światel, tj. obszarowej sumy przeciętnej rocznej wartości radiancji w Polsce. Opracowane na podstawie obserwacji VIIRS satelity Suomi-NPP

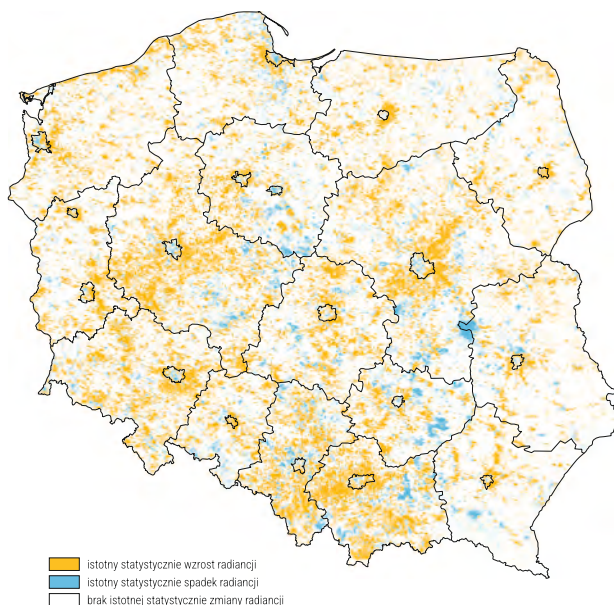


Rys. 7. Rozkład przestrzenny radiancji nocnych światel (dokładniej: promieniowania elektromagnetycznego w zakresie $0,5\text{--}0,9 \mu\text{m}$) nad Polską w 2022 roku, na podstawie obserwacji VIIRS satelity Suomi-NPP

Szukając najjaśniejszego miejsca na nocnej mapie Polski (ryc. 7), trafimy nie na miasta, ale na szklarnie. Aż pięć najjaśniejszych lokalizacji w kraju to właśnie obiekty tego typu. Dla najjaśniejszej z nich (w Goczałkowicach-Zdroju) VIIRS wskazał w 2022 roku przeciętną radiancję sięgającą $1436 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. Dla porównania, okolice warszawskiego Pałacu Kultury i Nauki – najjaśniejsza w Polsce lokalizacja o typowo miejskim cha-



Rys. 8. Zmienność radiancji promieniowania w zakresie 0,5-0,9 μm w wybranych punktach Polski. Mniejsza liczba obserwacji w miesiącach letnich wynika z występowania dnia polarnego i negatywnego wpływu rozproszonego światła słonecznego na pomiar



Rys. 9. Lokalne tendencje zmiany wartości radiancji: wartość w 2022 roku względem średniej wartości z dekady 2012-2021

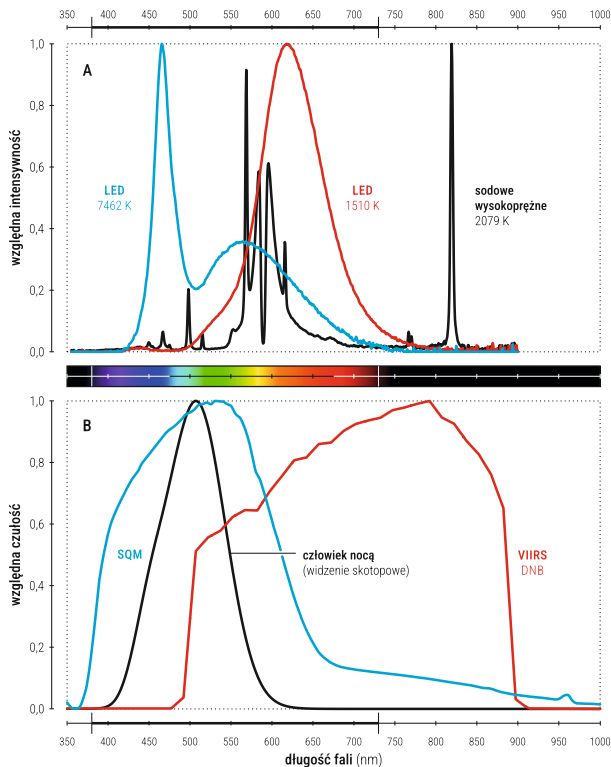
rakterze – cechowały się przeciętną radiancją równą $239 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Jaśnienie (czyli wzrost radiancji) nie było jednak równomierne (ryc. 8, ryc. 9). Istotny statystycznie wzrost radiancji w 2022 roku względem dekady 2012-2022 wystąpił na 23,3% powierzchni kraju (w 78% gmin), podczas gdy na 5,2% terytorium kraju radiancja spadła. Na pozostałym obszarze 12 lat obserwacji VIIRS okazało się niewystarczające, by uchwycić istotną statystyczną zmianę. W poszczególnych województwach proporcje były inne tak *in plus*, jak *in minus*. Przykładowo, radiancja wrosła aż na 40% powierzchni Małopolski, ale tylko na 13% powierzchni Podkarpacia. Gdy spojrzeć na miasta wojewódzkie, w zasadzie wszystkie doświadczyły wzrostu radiancji – najsilniejszego Opole (+21%) i Białystok (+15%). Na mapach obrazujących zmiany doskonale zaznaczyły się różnego rodzaju inwestycje infrastrukturalne. W szczególności węzły drogowe na drogach krajowych i autostradach czy też licznie otwierane (i bardzo intensywnie oświetlane) centra logistyczne firm kurierskich oraz sieci handlowych.

Znaczące spadki radiancji pojawiały się natomiast w centrach miast. Mogły wynikać ze zmiany charakteru oświetlenia, pojawienia się nowej zabudowy (zagęszczenia tkanki miejskiej), pojawienia się roślinności czy być efektem świadomych działań na rzecz redukcji zanieczyszczenia światłem. Bez bardzo szczegółowych badań w skali lokalnej nie sposób tego rzetelnie wyjaśnić. Trzeba brać też poprawkę na ograniczenia samego systemu obserwacyjnego. Mówiąc o zanieczyszczeniu światłem siłą rzeczy odwołujemy się do światła, a więc promieniowania z zakresu 380-780 nm, na które dodatkowo trzeba nałożyć krzywą czułości ludzkiego oka. A ta zmienia się z długością fali, przypomina bowiem rozkład gaussowski z maksimum czułości dla 555 nm w ciągu dnia (widzenie fotopowe) i 507 nm w ciągu nocy (widzenie skotopowe). Zestawienie funkcji czułości oka z czułością VIIRS od razu uświadamia, z jakim wyzwaniem musimy się mierzyć (ryc. 10).

Największy problem sprawia sam skaner VIIRS, który w zasadzie „nie widzi” promieniowania niebieskiego. Co prawda w nocnym pejzażu monochromatycznego światła niebieskiego jest tyle, co nic, jednak do środowiska w dużych ilościach emitują je diody LED stosowane w białym oświetleniu publicznym. Diody te świecą na biało, gdyż stanowiąca ich serce dioda (niebieska!) jest pokryta luminoforem. Od rodzaju luminoforu zależy jaką temperaturę barwową⁶ osiągnie światło. Światło o barwie ciepłej charakteryzuje niska temperatura barwowa, około 2000 K. Maksimum emisji wypada wtedy w zakresie światła czerwonego i pomarańczowego. Ochładzając światło, a więc zwiększając jego temperaturę barwową,

6. Jednym ze sposobów określania barw światła jest *temperatura barwowa* wyrażana w kelwinach (K) (przyp. red.).



Rys. 10. Charakterystyki spektralne wybranych źródeł światła (A) oraz czułości widmowe wybranych detektorów światła (B)

przesuwamy maksimum emisji w stronę fal krótszych. „Zimne” diody LED, świecące „ostrym” światłem białym, cechuje temperatura barwowa ~ 7000 K, co przypomina dzienne światło słoneczne (dla porównania, w czasie zachodu Słońca do naszych oczu trafia światło o temperaturze barwowej około 3000 K). Widmo emisyjne stosowanego powszechnie w polskich miastach wysoko-
prężnego oświetlenia sodowego ma dwa piki. Pierwszy znajduje się w podczerwieni (~ 830 nm), drugi w okolicach 600 nm. Nasze oczy widzą tylko ten drugi i dlatego lampy sodowe znamy jako pomarańczowe. Gdy lampę sodową zastąpimy LED-ową, to po pierwsze likwidujemy pik w podczerwieni, a po drugie dodajemy pik w zakresie promieniowania niebieskiego (tym większy, im wyższa temperatura barwowa). VIIRS zarejestruje ubytek w podczerwieni, ale już nie zarejestruje ewentualnego wzrostu emisji w zakresie fal krótkich.

Sięgając po VIIRS do monitoringu zanieczyszczenia światłem dostajemy więc niezłą łamigłówkę. Czy spadek radiancji, jaki VIIRS mierzy, jest spadkiem faktycznym, czy tylko pozornym, wynikającym ze zmiany typu oświetlenia? Dużo zależy od tego, po jakie oprawy oświetleniowe (zob. ryc. 1) sięgają włodarze miast. Zaleca się, by lampy sodowe zastępowali LED-owymi o takiej samej temperaturze barwowej. Nagminnie staje się jednak zamienianie nocy w dzień i zalewanie całych dzielnic światłem zimnym (o temperaturze barwowej > 5000 K). Wniosek: wskazania VIIRS musimy uznać za optymistyczne, jednak część spadków radiancji w Polsce nie

musi oznaczać rzeczywistego spadku zanieczyszczenia światłem.

Mniej istotna, choć nie bez znaczenia, jest też pora obserwacji VIIRS. O ile sięgając po radiometry i fotometry naziemne jesteśmy w stanie prowadzić obserwacje ciągłe dla danej lokalizacji, o tyle czas pomiaru z orbity jest zeterminowany specyfiką orbity. VIIRS pracuje na niskiej (830 km), wstecznej orbicie okołobiegunowej (98.8°). Dzięki temu uzyskiwana jest *heliosynchroniczność*, tj. satelita przelatuje nad danym obszarem zawsze o tej samej porze lokalnego czasu słonecznego. Dla VIIRS wybrano godzinę $01:30$ w nocy. Co za tym idzie, wszelkie dane VIIRS (i pochodne, jak modelowe mapy jasności nieba) informują wyłącznie o świetle emitowanym z Ziemi o tej właśnie porze.

Pomimo ograniczeń istniejących metod badawczych, wniosek z obserwacji jest jeden: zanieczyszczenie światłem w Polsce (ale też na świecie) jest zjawiskiem powszechnym i nasila się [12, 13]. Trend ten można odwrócić stosownymi regulacjami prawnymi, zmuszającymi nie tyle do wyłączenia wszelkich instalacji oświetleniowych po zmroku (nonsens!), co do wprowadzenia **polityki zrównoważonego oświetlenia** [14, 15]. Jej filarem jest kilka prostych zasad. Po pierwsze, jeśli nie musisz – nie świeć. Gdy świecisz, zadбай o to, by światło nie uciekało na boki i w górę. Instaluj oświetlenie o temperaturze barwowej nie wyższej niż 2000 – 3000 K i intensywności dopasowanej do warunków. Stosuj wyłączniki czasowe i detektory ruchu, by nie emitować światła, które nikomu nie służy.

To są wskazówki, które już teraz każdy z nas może wdrożyć na własnym podwórku czy osiedlu. Wystarczy chcieć. W efekcie zmniejszy się ucieczka światła do środowiska, z korzyścią dla naszego bezpieczeństwa, zdrowia i portfela (bo za marnowane światło przecież też płacimy). Poprawi się też kondycja ekosystemów, a i astronomowie się ucieszą. To jedna z tych rzadkich sytuacji, gdy zmiana przynosi same korzyść i to każdej ze stron.

Dzisiejsze badania zanieczyszczenia światłem nie byłyby możliwe, gdyby nie radiometria i fotometria zarówno te naziemne, jak i satelitarne, co – mam nadzieję – udało mi się pokazać w niniejszym tekście. Pomiar nadmiaru światła same w sobie oczywiście nie rozwiążą problemu, ale są kluczowym elementem poznania skali zjawiska, które wywołaliśmy i w centrum którego się znajdujemy; są krokiem do zrozumienia, że światło ma tak jasną, jak i ciemną stronę. **Bądźmy tego świadomi i dla własnego dobra ocalmy noc.** A przynajmniej to, co z niej jeszcze zostało.

Literatura

- [1] Walker M.F., „The California site survey” Publ. Astron. Soc. Pacific 82 (1970).

- [2] Berry R.L., „Light Pollution in Southern Ontario” *J. R. Astron. Soc. Canada* 70 (1976).
- [3] Garstang R.H., „Model for artificial night-sky illumination” *Publ. Astron. Soc. Pacific* 98 (1986).
- [4] Garstang R.H., „Night sky brightness at observatories and sites” *Publ. Astron. Soc. Pacific* 101 (1989).
- [5] Cinzano P. i Falchi F., „The propagation of light pollution in the atmosphere” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 427 (2012).
- [6] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., „The first World Atlas of the artificial night sky brightness” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 328 (2001).
- [7] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., „The new world atlas of artificial night sky brightness” *Sci. Adv.* 2 (2016).
- [8] Elvidge C.D., Baugh K.E., Dietz J.B., Bland T., Sutton P.C., Kroehl H.W., „Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlements” *Remote Sens. Environ.* 68 (1999).
- [9] Hsu F.-C., Baugh K.E., Ghosh T., Zhizhin M., Elvidge C.D., „DMSP-OLS Radiance Calibrated Nighttime Lights Time Series with Intercalibration” *Remote Sens.* 7 (2015).
- [10] Elvidge C.D., Baugh K., Zhizhin M., Hsu F.C., Ghosh T., „VIIRS night-time lights” *Int. J. Remote Sens.* 38 (2017).
- [11] Lee T.E., Miller S.D., Turk F.J., Schueler C., Julian R., Deyo S., Dills P., Wang S., „The NPOESS VIIRS day/night visible sensor” *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 87 (2006).
- [12] Kyba C.C.M., Altıntaş Y.Ö., Walker C.E., Newhouse, M., „Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022” *Science* 379 (2023).
- [13] Pawson S.M. i Bader M.K.-F., „LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature” *Ecol. Appl.* 24 (2014).
- [14] Zielinska-Dabkowska K.M., Schernhammer E.S., Hanifin J.P., Brainard G.C., „Reducing nighttime light exposure in the urban environment to benefit human health and society” *Science* 380 (2023).
- [15] Cao M., Xu T., Yin, D., „Understanding light pollution: Recent advances on its health threats and regulations” *J. Environ. Sci.* 127 (2023).