

WPŁYW PANDEMII COVID-19 NA ZANIECZYSZCZENIE ŚWIETLNE NOCNEGO NIEBA

DOI 10.34658/9788366741461.9

Tomasz Ścieżor

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

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

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

1. Wstęp

Od momentu, gdy zanieczyszczenia świetlne, zauważalne głównie w formie łuny świetlnej nocnego nieba, stało się nową formą zanieczyszczenia środowiska naturalnego, było oczywiste, że głównym jego źródłem są miasta, a w szczególności oświetlenie uliczne. W efekcie, literatura dotycząca tego zagadnienia jest bardzo obszerna. Warto tu wspomnieć, że już w 1866 roku francuski popularyzator nauki, Amédée Guillemin, stwierdził, że w centrach dużych miast nie można dostrzec słabych

gwiazd, za co jednak chyba głównie odpowiedzialny był smog, zalegający atmosferę Paryża czy Londynu [1].

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

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

Wpływ miast na zanieczyszczenie świetlne był również przedmiotem badań terenowych. Stało się to możliwe dzięki wprowadzeniu na rynek tanich mierników jasności nieba typu *Sky Quality Meter* (SQM), które stały się pewnego rodzaju standardem pomiarowym. Jedną z pierwszych akcji pomiarowych jasności nocnego, bezchmurnego nieba z wykorzystaniem mierników SQM były pomiary tej wielkości na terenie obszaru ochrony krajobrazowej Zselic (*Zselic Landscape Protection Area*) na Węgrzech [20]. Pomiary miały na celu zarówno sprawdzenie przydatności mierników SQM do tego typu badań, jak też zmierzenie jakości nocnego nieba w nowo założonym obszarze ochrony nocnego nieba. Innego rodzaju pomiary, wykorzystujące mierniki SQM, były wykonane w Hongkongu i okolicach w latach 2008–2009. Tym razem

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

mierzono jasność nieba zarówno bezchmurnego, jak i zachmurzonego. W efekcie powstała mapa zanieczyszczenia świetlnego Hongkongu i okolic [21]. Pomiaru były korelowane z danymi meteorologicznymi, jak też z danymi środowiskowymi dotyczącymi zawartości dwutlenku siarki, tlenków azotu, tlenku węgla i pyłów zawieszonych.

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

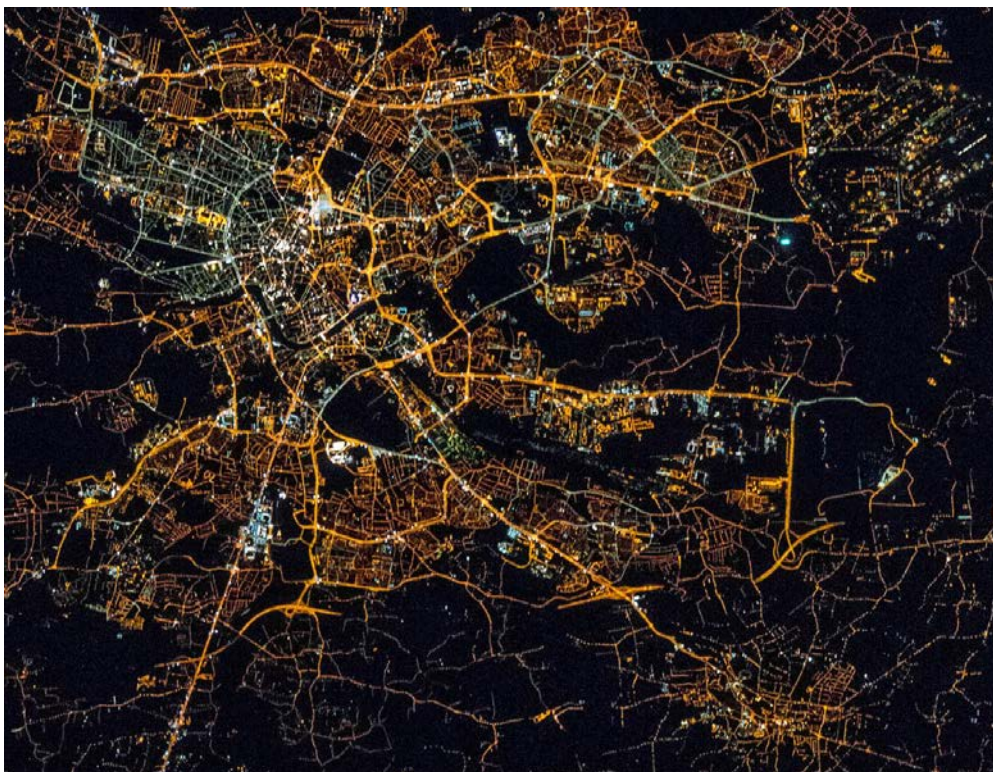
Od 1972 roku stała się możliwa ilościowa analiza emisji światła z miast (radiancji) na podstawie zdjęć satelitarnych wykonanych przez satelity DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*). Wspomniane wcześniej modele pozwalają na prognozowanie, jaka część światła, przechodzącego przez atmosferę,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

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

W 2018 roku na orbitę wystrzelono satelitę Luojia 1-01 CubeSat (6U), zbudowanego przez Uniwersytet Wuhan (Chiny). Jest to pierwszy satelita dedykowany obserwacjom nocnych źródeł światła na powierzchni Ziemi. Satelita ten dostarcza

obrazy o rozdzielczości przestrzennej 130 m, czyli znacznie lepszej zarówno od DMSP/OLS, jak też Suomi–NPP/VIRS [34]. Stwarza to nowe perspektywy dla teledetekcji światel nocnych [35].

Dodatkowo, do analizy wpływu poszczególnych rodzajów oświetlenia miejskiego, można wykorzystać wysokorozdzielcze zdjęcia niektórych miast wykonane z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS). Tego rodzaju zdjęcie Krakowa zostało również wykonane 28 marca 2017 (rys. 1). Można na nim wyróżnić wszystkie rodzaje ciągów komunikacyjnych, jak również, na podstawie różnic w ich kolorach, wydzielić części miasta, w których oświetlenie metalohalogenkowe lub wysokoprężne sodowe (HPSL) zostało zastąpione przez oświetlenie typu LED⁴.



Rys. 1. Nocna fotografia śródmieścia Krakowa wykonana z Międzynarodowej Stacji Kosmicznej 28 marca 2017 (północ u góry)

Źródło: <http://eol.jsc.nasa.gov/>

Jedną z pierwszych analiz wkładu poszczególnych rodzajów oświetlenia miejskiego do całkowitej radiancji miejscowości było oszacowanie tej wielkości dla miasta Flagstaff (Arizona, USA) w 2009 roku [36]. Stwierdzono, że około 8,3% światła

⁴ Identyfikacja ta została potwierdzona w trakcie przeprowadzonych obserwacji terenowych.

miejskiego „ucieka” w przestrzeń kosmiczną, z czego, z kolei, 33% pochodzi z oświetlenia obiektów sportowych. Po wyłączeniu tego rodzaju oświetlenia, oświetlenie komercyjne i przemysłowe stanowiło 62%, natomiast oświetlenie mieszkaniowe 14%, a drogowe 12%.

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

Innym przykładem może być awaria zasilania w części Krakowa późnym wieczorem 25 sierpnia 2011 roku [38]. Podczas awarii na ponad dwie godziny pozbawiony został jakiegokolwiek zasilania (zarówno mieszkań, jak również oświetlenia ulicznego) zwarty obszar o powierzchni 2 km² i populacji około 50 tys. Po usunięciu awarii, przy praktycznie bezchmurnym niebie, zmierzona w pobliżu centrum tego obszaru zenitalna jasność powierzchniowa nieba wynosiła 17,51 mag/arcsec² (10,79 mcd/m²). W czasie trwania awarii ta sama wielkość wynosiła 18,07 mag/arcsec² (6,44 mcd/m²). W trakcie usuwania awarii przez około pół godziny pozbawione energii elektrycznej były jedynie najbliższe okolice miejsca pomiarowego o powierzchni około 0,03 km². Zmierzona wtedy zenitalna jasność powierzchniowa nieba wynosiła 17,72 mag/arcsec² (8,90 mcd/m²). Pomiaru wykonywane w czasie trwania zjawiska pozwoliły na analizę wpływu lokalnego oświetlenia na sztuczną poświatę niebieską całego miasta. Stwierdzono, że całkowite wyłączenie oświetlenia na badanym obszarze, stanowiącym zaledwie 4% powierzchni miasta, powoduje zmniejszenie zenitalnej jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba, o 40%.

W 2016 roku, wykorzystując automatyczne, regularne, wyłączania oświetlenia ozdobnego w miejscowości Balaguer oraz wszystkich lamp publicznych w miejscowości Àger (obydwie w pobliżu Parku Astronomicznego Montsec w Hiszpanii), przeprowadzono różnicowe pomiary fotometryczne zmian jasności nocnego nieba oraz luminancji [39]. Stwierdzono, że przy bezchmurnym niebie oświetlenie ozdobne w Balaguer odpowiada za ponad 20% jasności nieba w zenicie, podczas gdy w pobliżu Àger stwierdzono jedynie bardzo małe zmiany w oświetleniu powierzchni ziemi w pochmurną noc. Podobne pomiary, jednak w znacznie mniejszej skali, przeprowadzono w parku miejskim Tiergarten w Berlinie (Niemcy) podczas Godziny dla Ziemi w 2018 roku [40]. Stwierdzono, że wyłączenie pobliskiego oświetlenia Potsdamer Platz spowodowało spadek wartości luminancji skalarnej o 15%, zmniejszenie luminancji poziomej o 11% i zmniejszenie luminancji zenitalnej o 8%.

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

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

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

Oczywiście, wprowadzone lockdowny skłoniły wielu badaczy zanieczyszczenia światłem do zbadania zmian, jakie spowodowały one w jasności łun świetlnych. Skutki zmniejszenia emisji światła w mieście zostały opisane dla Granady (Hiszpania) [44]. W badaniach uwzględniono zarówno pomiary naziemne, jak też dane satelitarne. Pomiary prowadzone od 14 marca do 31 maja 2020 roku wykazały wyraźne zmniejszenie zanieczyszczenia światłem związane zarówno ze zmniejszeniem emisji światła z obszaru miasta, jak też ze zmniejszeniem zawartości aerozoli antropogenicznych w atmosferze, które są źródłem rozproszenia światła. Stwierdzono wyraźną korelację między poziomem zanieczyszczenia atmosfery pyłem zawieszonym

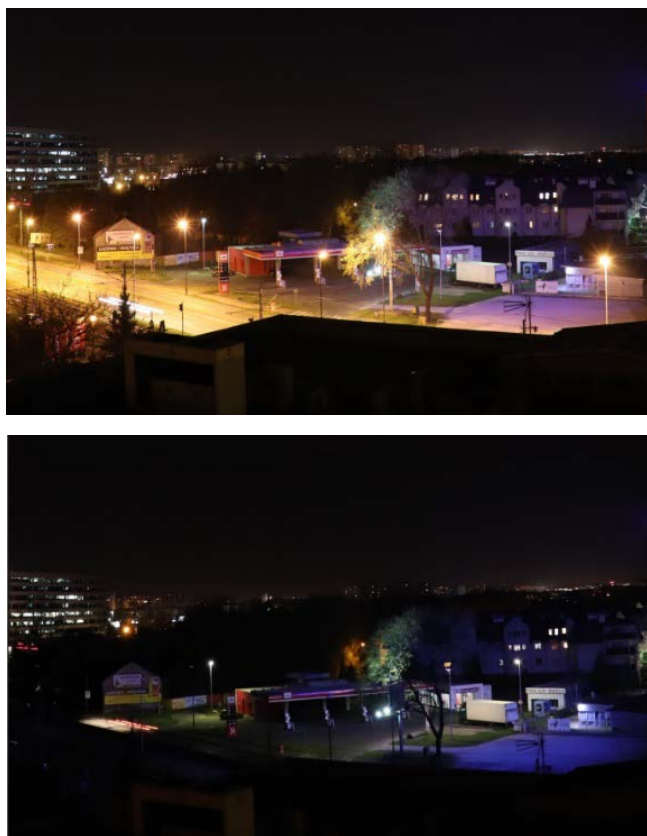
PM10 a mierzoną jasnością nieba – wraz ze wzrostem zanieczyszczenia atmosfery, rośnie jasność nocnego nieba w mieście. Pomiary naziemne wykazały niewielkie zmiany jasności nocnego nieba w drugiej połowie roku w porównaniu do pierwszej połowy. Jednocześnie, zdjęcia satelitarne nie wykazały znaczących zmian całkowitej radiancji w czasie lockdownu. Zważywszy na to, że aktywność zewnętrzna ludności zmniejszyła się w tym czasie nawet o 90% może to oznaczać, że radiancja miasta jest zdominowana przez oświetlenie stałe, które nie zmienia się w zależności od aktywności jego mieszkańców.

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

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

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

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



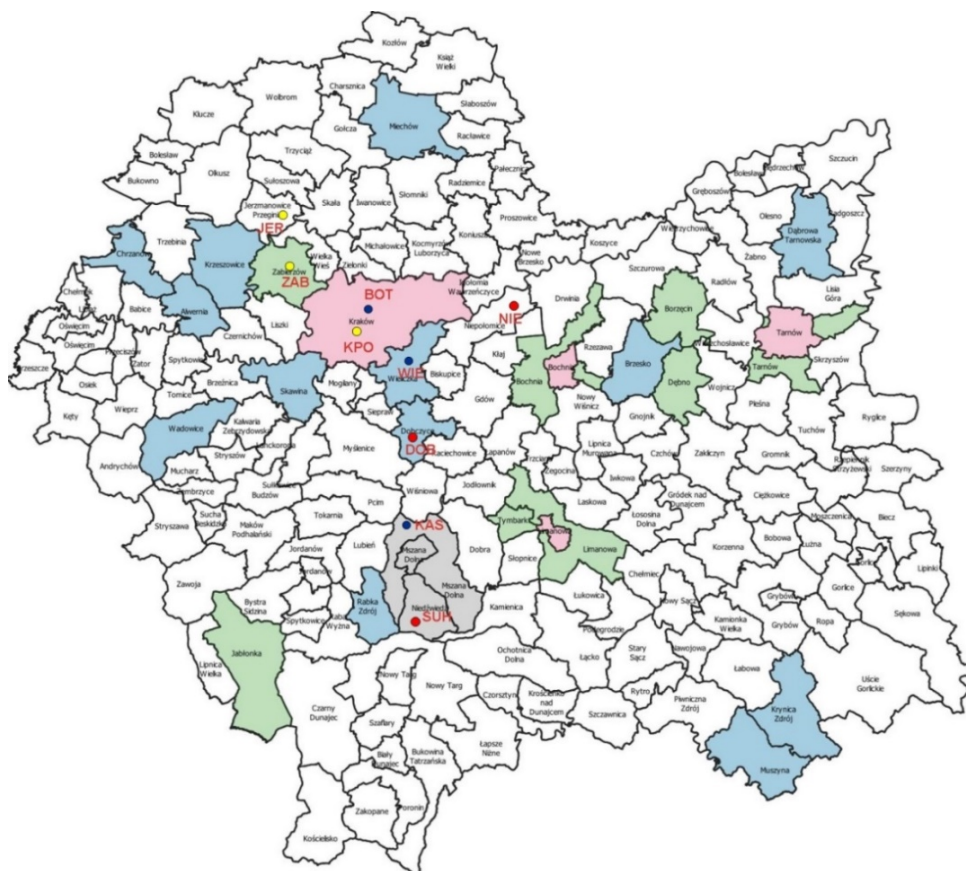
Rys. 2. Wyłączenie oświetlenia ulicznego w Krakowie. Zdjęcia wykonano przy tych samych ustawieniach aparatu Canon EOS 800D (ISO 1600, F 5.6, 1 s) 15 minut przed północą (po lewej) i 11 minut po północy (po prawej) w nocy z 17 na 18 kwietnia 2020 roku. Jedynymi nadal aktywnymi źródłami światła pozostał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

Źródło: fotografie własne.

2. Obszar badań

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

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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1.

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

2.1. Źródła zanieczyszczenia świetlnego

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

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

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

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

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

2.2. Wyłączenia oświetlenia ulicznego

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

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

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

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

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

Tabela 1. (cd.)

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

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

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

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

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

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

2.3. Stanowiska pomiarowe

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

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

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

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

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

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

W kolumnie „Dane meteo.” zamieszczono informacje, czy dostępne były dane ze stacji meteorologicznych. Kolumna „Max. S_a” podaje najwyższą zmierzoną wartość tej jasności (czyli przy najciemniejszym możliwym, bezchmurnym i bezksiężycowym niebie) [mag/arcsec²]

3. Metodologia pomiarów

3.1. Stosowane jednostki

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

3.1.1. Jednostki radiometryczne

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

3.1.2. Jednostki fotometryczne

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

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

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

czyli,

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

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

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

3.2. Teledetekcja satelitarna

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

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

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

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

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

3.3. Naziemne pomiary jasności tony świetlnej

Pomiary jasności powierzchniowej nocnego nieba (tłony świetlnej) wykonywane były przy użyciu mierników Sky Quality Meter (SQM) firmy Unihedron. Mierniki te podają mierzoną wielkość w powszechnie używanych w astronomii, jak też w ocenie jakości nocnego nieba, jednostkach jasności powierzchniowej: magnitudo na sekundę łuku do kwadratu – mag/arcsec². Różnice między wartościami wyznaczonymi przez mierniki a używanym w astronomii standardem V będą zależą od rodzaju mierzonego źródła i dla obszaru zastosowań SQM mieszczą się w zakresie (SQM–V) od –0,13 do +0,11 mag/arcsec² [57, 58]. Dla nieba naturalnego i średnio zanieczyszczonego świetlnie należy przyjąć różnicę $0,17 \pm 0,07$ mag/arcsec². W niniejszej pracy analizowane są różnice, czyli wartości względne wskazań danego miernika, w związku z czym zarówno ta korekta, jak też wynikająca z zastosowanej szybki osłaniającej detektor ($0,1$ mag/arcsec²) nie są uwzględniane.

Mierniki SQM produkowane są w kilku wersjach, z których w opisywanych badaniach wykorzystano: ręcznie wyzwalany SQM–L, sterowany komputerowo SQM–LE oraz autonomiczny SQM–LU–DL. Wszystkie te mierniki posiadają kąt zbierania światła wynoszący 20° od osi przyrządu. W czasie wykonywania pomiarów skierowane były w kierunku zenitu z dokładnością do około 3°. Dokładność pomiaru, podana przez producenta, wynosi $0,1$ mag/arcsec², jednak wielokrotne pomiary pozwoliły stwierdzić, że amplituda zmian wartości S_a w każdym badanym egzemplarzu miernika w stabilnych warunkach atmosferycznych nie przekracza $0,02$ mag/arcsec². W związku z tym w przypadku SQM–L pomiar wyzwalano dotąd, dopóki trzy kolejne odczyty nie były wzajemnie zgodne z dokładnością $0,01$ – $0,02$ mag/arcsec² i w tym czasie nie obserwowano jakiegokolwiek trendu zmian. W efekcie przyjęto $0,02$ mag/arcsec² jako wielkość błędu pomiarowego.

W przypadku mierników SQM–LE i SQM–LU–DL, na podstawie przebiegu krzywej zmian jasności w ciągu bezchmurnej i bezksiężycowej nocy, w analizie uwzględniano jedynie takie dane, gdy w okresie wyłączenia oświetlenia ulicznego zmiany S_a nie przekraczały $0,03$ mag/arcsec² (taką też przyjęto wartość błędu pomiarowego dla tego rodzaju pomiarów).

3.4. Informacje o wyłączeniach oświetlenia ulicznego

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

4. Wyniki pomiarów

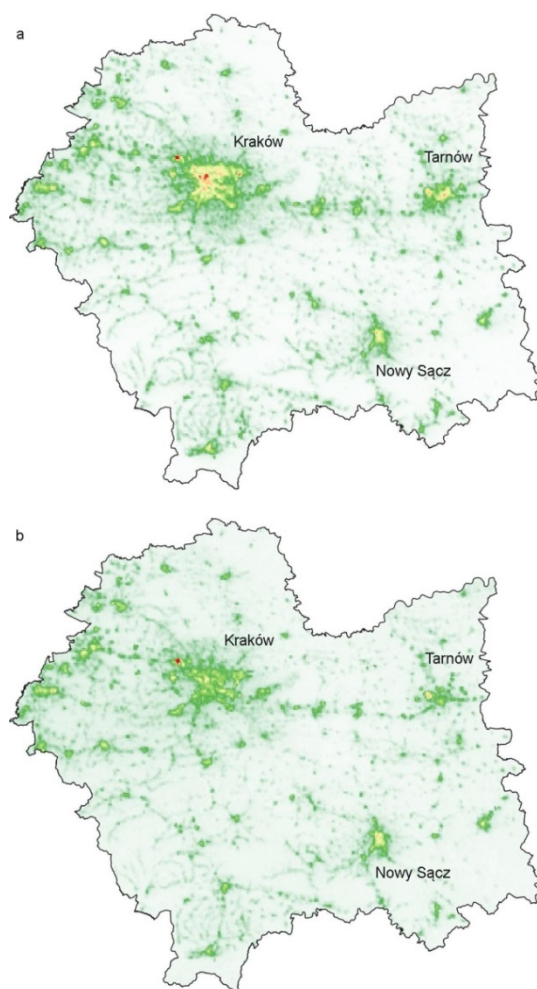
4.1. Teledetekcja

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

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

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

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



Rys. 4. Radiancja z obszaru województwa małopolskiego w marcu (a) i w maju (b) 2020 r.

Widoczne największe miasta regionu: Kraków, Tarnów i Nowy Sącz.

W przypadku dwóch pierwszych widoczne zmniejszenie radiancji na skutek wyłączenia oświetlenia komunalnego w maju

Źródło: opracowanie własne na podstawie zdjęć VIIRS/DNB.

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

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

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

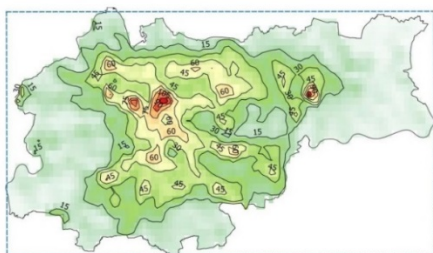
Miejscowość	Powierzchnia obszaru pomiaru [km ²]	Populacja miejscowości	Radiancja w marcu 2020 [nW/cm ² ·sr]	Minimalna radiancja w 2020 (miesiąc) [nW/cm ² ·sr]
Alwernia	19,64	3380	609	217 (12)
Bochnia	20,55	29992	1856	584 (06)
Borzęcin	3,37	3865	109	33 (05)
Brzesko	9,92	16827	1085	559 (06)
Chrzanów	20,61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

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

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

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

Kraków

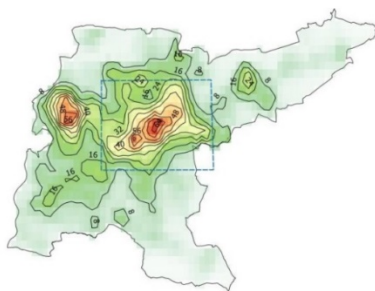


marzec 2020

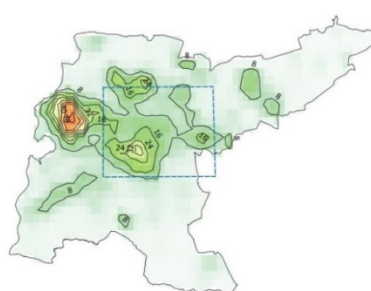


maj 2020

Tarnów



marzec 2020

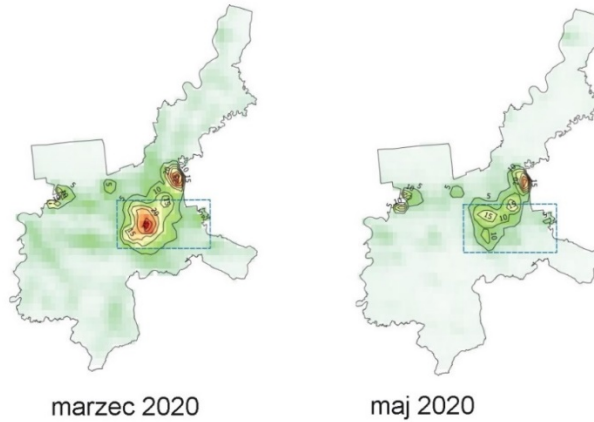


maj 2020

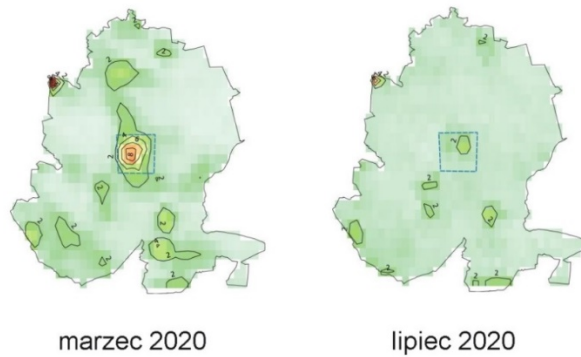
Rys. 5. Zmiany radiancji, wynikające z wyłączenia oświetlenia komunalnego w 2020 r., dla największych miast województwa małopolskiego: Krakowa i Tarnowa. Niebieskim czworo-kątem zaznaczono obszar, dla którego wykonano pomiary radiancji. Etykiety warstwic wyrażone są w $\text{nW}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie zdjęć VIIRS/DNB.

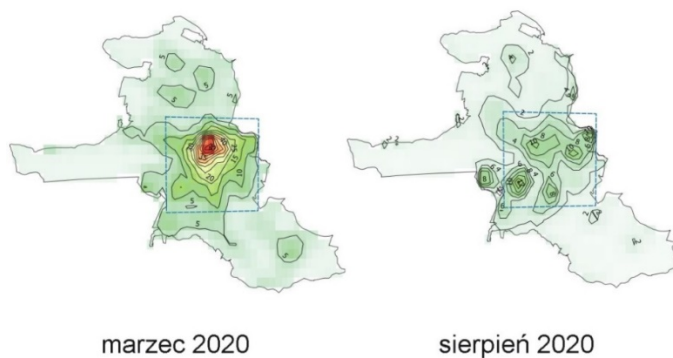
Bochnia



Borzęcin



Chrzanów



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie zdjęć VIIRS/DNB.

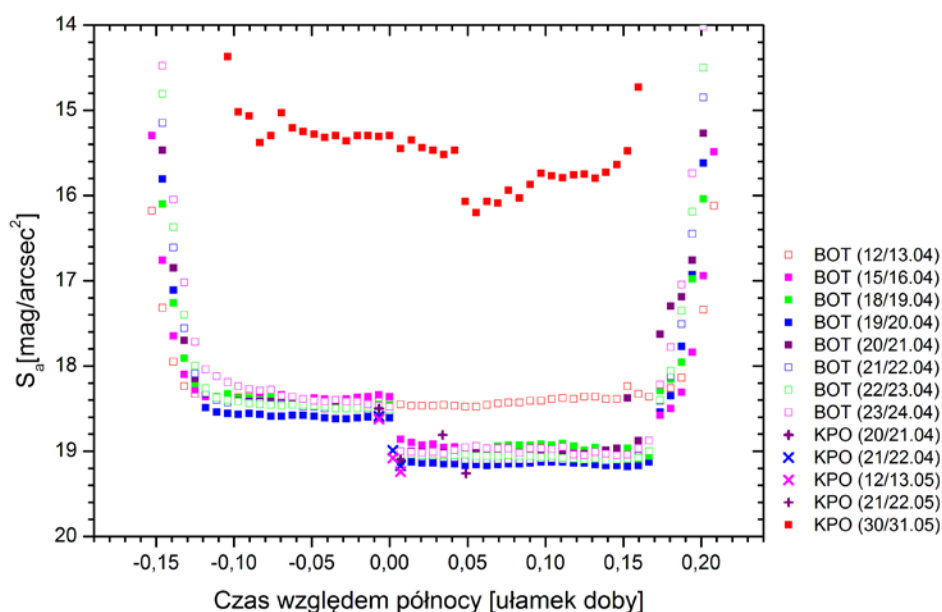
4.2. Pomiary zenitalnej jasności powierzchniowej nocnego nieba

4.2.1. Pomiary w bezchmurne i bezksiężycowe noce

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

Na stanowiskach kontrolnych KAS i SUH w ciągu całego okresu pomiarowego nie stwierdzono zmian wartości S_a , które mogłyby być powiązane z wyłączeniami oświetlenia w Krakowie bądź w sąsiednich gminach. W przypadku stanowiska KAS w badanym okresie w bezchmurne i bezksiężycowe noce wartość S_a wynosiła: $21,25 \pm 0,01$ mag/arcsec², w przypadku stanowiska SUH: $21,78 \pm 0,01$ mag/arcsec².

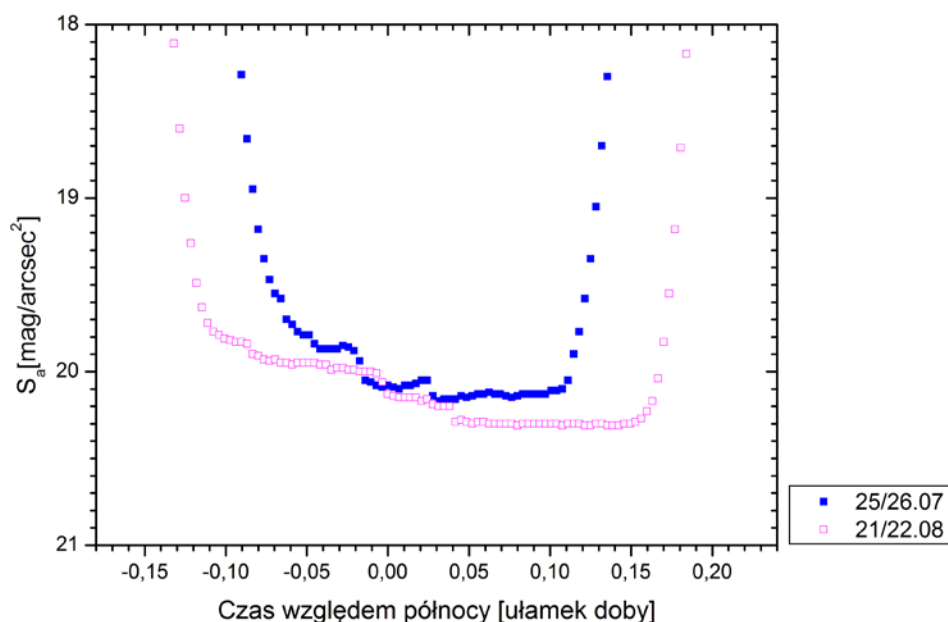
Najbardziej kompleksowe pomiary jasności nieba wykonano w Krakowie. Rysunek 7 przedstawia przykładowe zmiany wartości S_a w czasie wybranych bezchmurnych i bezksiężycowych nocy w Krakowie (SQM–LU–DL: BOT; SQM–L: KPO). Dla porównania pokazano również zmiany S_a w czasie nocy poprzedzającej okres wyłączania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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

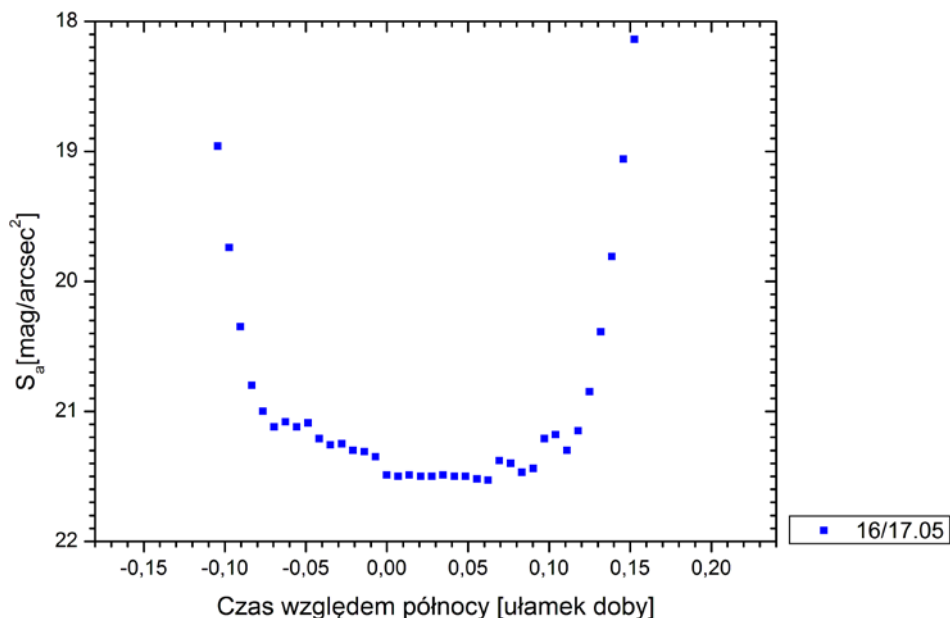
Rysunek 8 przedstawia analogiczne przykładowe pomiary wykonane w Wieliczce (stanowisko WIE). Widoczne jest dwuetapowe zmniejszanie jasności nocnego nieba związane z tym, że część zegarów astronomicznych, sterujących procesem wyłączania oświetlenia ulicznego, nie była przestawiona na tzw. czas letni (CEST).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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

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

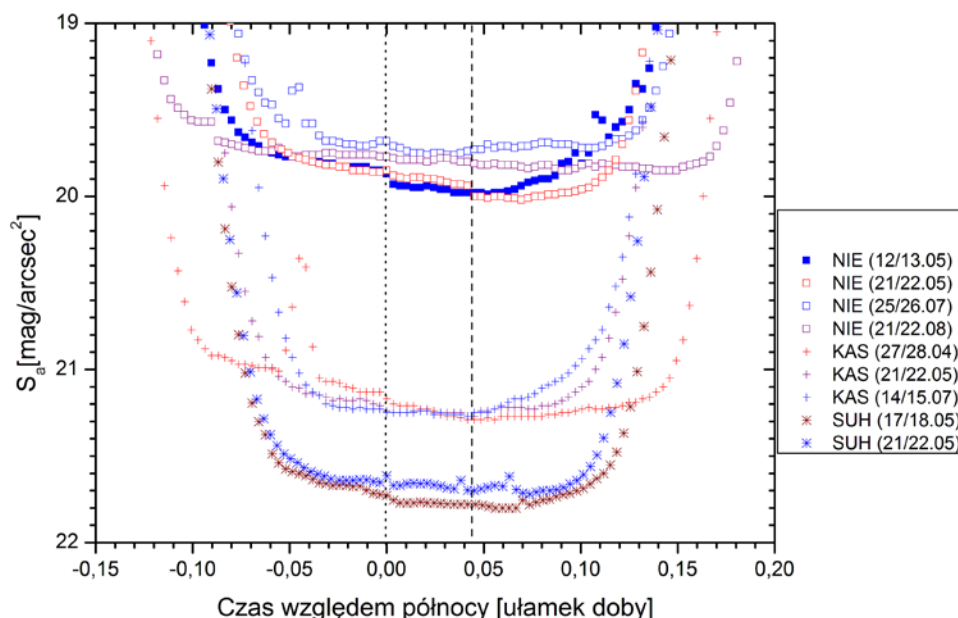


Rys. 9. Przykładowe zmiany wartości S_a w Dobczycach (stanowisko DOB) w nocy 16/17 maja 2020 roku

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

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

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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

4.2.2. Pomiary w nocy zachmurzone

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

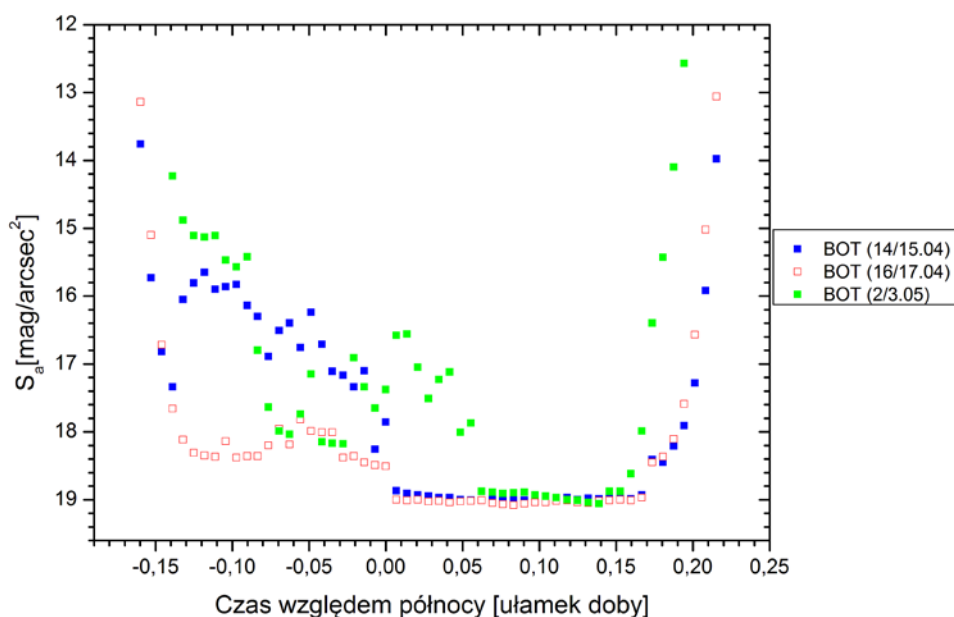
Tabela 4. Zmiany wartości S_a przy pełnym zachmurzeniu, zmierzone przy pomocy ręcznych mierników SQM–L na stanowiskach KPO i KPO2

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

Tabela 4. (cd.)

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

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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

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

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

5. Dyskusja

5.1. Analiza pomiarów radiancji

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

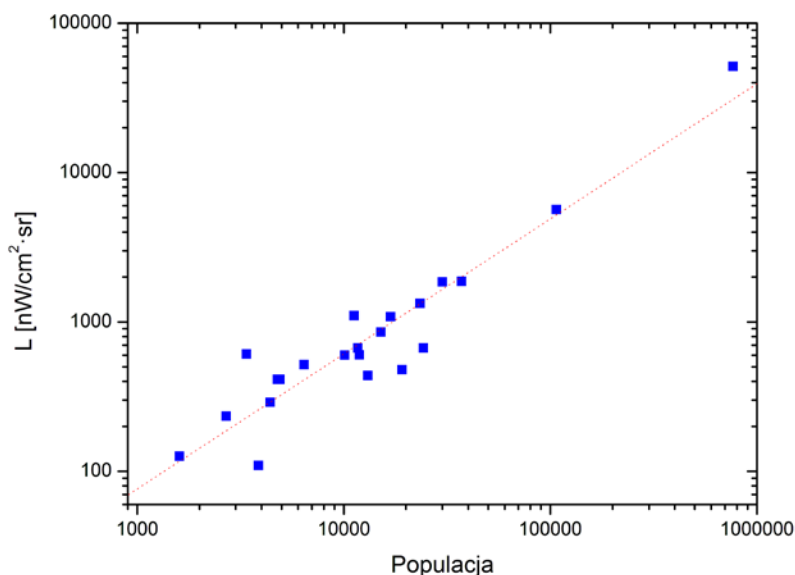
Tabela 5. Zestawienie pomiarów radiancji na km^2 w wytypowanych miejscowościach gminnych województwa małopolskiego w marcu 2020 roku (posortowanych malejąco)

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

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych VIIRS/SNC.

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

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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

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

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

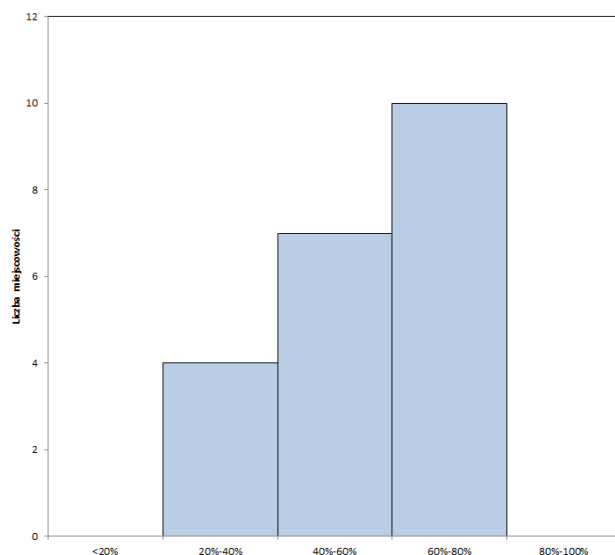
Tabela 6. Zmniejszenie się radiancji w wytypowanych miejscowościach gminnych województwa małopolskiego w 2020 roku związane z wyłączaniem oświetlenia komunalnego

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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

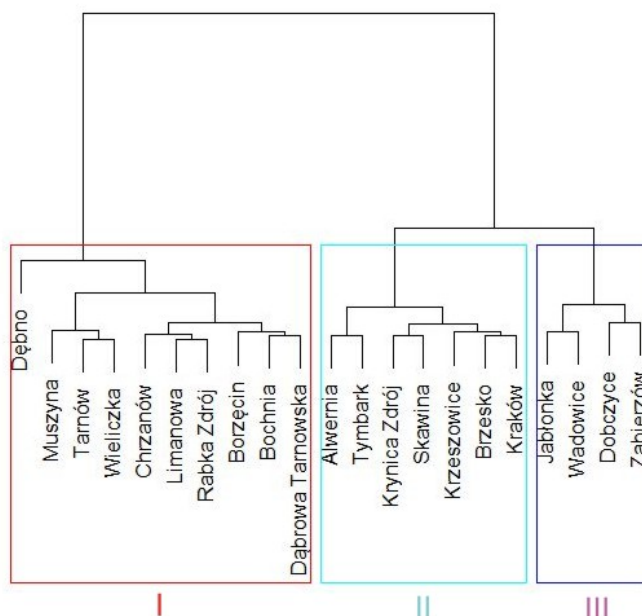
W celu uzyskania pełniejszego obrazu wpływu wyłączeń oświetlenia komunalnego na radiancję z poszczególnych miejscowości wykonano statystyczną analizę skupień. Na podstawie analizy elbow oraz analizy otrzymanego dendrogramu (rys. 14) można wyróżnić trzy skupienia (klastry) miejscowości. Ze względu na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

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



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów własnych.

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

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

5.2. Analiza pomiarów jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba

W tabeli 7 zestawiono zmiany jasności powierzchniowej nocnego bezchmurnego i bezksiężycowego nieba (S_a) zmierzone na stanowiskach pomiarowych znajdujących się w miejscowościach, w których wyłączano oświetlenie komunalne: Krakowie (BOT, KPO, KPO2), Wielicze (WIE) i Dobczycach (DOB). Oprócz zmierzonych średnich wartości S_{a1} (przed momentem wyłączenia) i S_{a2} (po momencie wyłączenia) i ich różnic (ΔS_a) [mag/arcsec²] podano odpowiadające im wartości luminancji L_{v1} i L_{v2} [mcd/m²] oraz ich różnicę bezwzględną (ΔL_v) i względną ($\Delta L_v[\%]$).

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

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

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pomiarowych.

Analizując zawartość tabeli 7 można zauważyć, że zarówno w Krakowie, jak i w Wielicze, pomimo dużej różnicy wielkości zmniejszenia radiancji między tymi miejscowościami (Kraków: 25161 nW/cm²·sr/km², Wieliczka: 840 nW/cm²·sr/km²), jasność powierzchniowa nocnego nieba zmniejsza się o około 0,5 mag/arcsec². Co ciekawe, na wielkość tę w niewielkim stopniu wpływa światło Księżyca w pełni (rys. 13). Względna zmiana luminancji w obu przypadkach wynosi około 40%, pomimo

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

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

5.3. Analiza pomiarów jasności powierzchniowej nocnego, zachmurzonego nieba

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

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

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

6. Wnioski

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

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

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

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

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

Podziękowania

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

Literatura

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

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

- network, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 139, s. 90–108, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.014.
- [23] Kubala M., Ścieżor T., Dworak T.Z., Kaszowski W., *Artificial Sky Glow in Cracow Agglomeration*, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2009, 18, s. 194–199.
 - [24] Ścieżor T., Kubala M., Kaszowski W., Dworak T.Z., *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej*, Monografia 388, Politechnika Krakowska, Kraków, 2010.
 - [25] Ścieżor T., Kubala M., *Particulate matter as an amplifier for astronomical light pollution*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 444, s. 2487–2493, DOI: 10.1093/mnras/stu1577
 - [26] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, 328, s. 689–707, DOI: 10.1046/j.1365–8711.2001.04882.x.
 - [27] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., Baugh K.E., *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2000, 318, s. 641–657, DOI: 10.1046/j.1365–8711.2000.03562.x.
 - [28] Cinzano P., Elvidge C.D., *Night sky brightness at sites from DMSP–OLS satellite measurements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 353, s. 1107–1116, DOI: 10.1111/j.1365–2966.2004.08132.x.
 - [29] Wolfe R.E., Lin G., Nishihama M., Tewari K.P., Tilton J.C., Isaacman A.R., *Suomi NPP VIIRS prelaunch and on-orbit geometric calibration and characterization*, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2013, 118, s. 11508–11521, DOI: 10.1002/jgrd.50873.
 - [30] VIIRS Maps, <https://www.lightpollutionmap.info> (dostęp: 3 stycznia 2022).
 - [31] Elvidge C.D., Baugh K.E., Zhizhin M., Hsu F.-C., *Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights*, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013, 35, s. 62, DOI: 10.1215/APAN.35.7.
 - [32] Duriscoe D.M., Anderson S.J., Luginbuhl C.B., Baugh K.E., *A simplified model of all-sky artificial sky glow derived from VIIRS Day/Night band data*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 214, s. 133–145, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.028.
 - [33] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., *The new world atlas of artificial night sky brightness*, *Science Advances*, 2016, 2, e1600377, DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
 - [34] Zhang C., Pei Y., Li J., Qin Q., Yue J., *Application of LuoJia 1–01 Nighttime Images for Detecting the Light Changes for the 2019 Spring Festival in Western Cities, China*, *Remote Sensing*, 2020, 12, DOI: 10.3390/rs12091416.
 - [35] Levin N., Kyba C.C.M., Zhang Q., Sánchez de Miguel A., Román M.O., Li X., Portnov B.A., Molthan A.L., Jechow, A., Miller S.D., *Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future*, *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111443.
 - [36] Luginbuhl C.B., Lockwood G.W., Davis D.R., Pick K., Selders J., *From The Ground Up I: Light Pollution Sources in Flagstaff, Arizona*. Publications of The Astronomical Society of The Pacific, 2009, 121, s. 185–203, DOI: 10.1086/597625.
 - [37] Hiscocks P.D., Gudmundsson S., Hiscocks P.D., Gudmundsson S., *The Contribution of Street Lighting to Light Pollution*, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 2010, 104, s. 190–192.

- [38] Ścieżor T., Kubala M., *Wpływ chmur niskich i wysokich na bliskie i dalekie zanieczyszczenie świetlne*, Czasopismo Techniczne, 2012, 109, 23, s. 253–260, DOI: 10.4467/2353737XCT.14.065.1842.
- [39] Jechow A., Ribas S.J., Domingo R.C., Hölker F., Kolláth Z., Kyba C.C.M., *Tracking the dynamics of skyglow with differential photometry using a digital camera with fisheye lens*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 209, s. 212–223, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.01.032.
- [40] Jechow A., *Observing the impact of WWF earth hour on Urban light pollution: A case study in Berlin 2018 using differential photometry*, Sustainability, 2019, 11, s. 750, DOI: doi.org/10.3390/su11030750.
- [41] Kyba C., Ruby A., Kuechly Dipl-Geoö kol H., Kinzey B.M., Miller N.M., Sanders M.B.A. J., Barentine J., Kleinodt Dipl-Ing R., Espey B., *Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas*. Lighting Research and Technology, 2020, DOI: 10.1177/1477153520958463.
- [42] Barentine J.C., Kundracik F., Kocifaj M., Sanders J.C., Esquerdo G.A., Dalton A.M., Foott B., Grauer A., Tucker S., Kyba C.C.M., *Recovering the city street lighting fraction from skyglow measurements in a large-scale municipal dimming experiment*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 253, 107120, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107120.
- [43] Kyba C.C.M., Ruby A., Kuechly H.U., Kinzey B., Miller N., Sanders J., Barentine J., Kleinodt R., Espey B., *Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas*, Lighting Research and Technology, 2020, DOI: 10.1177/1477153520958463.
- [44] Bustamante–Calabria M., de Miguel A.S., Martín–Ruiz S., Ortiz J.L., Vílchez J.M., Pelegrina A., García A., Zamorano J., Bennie J., Gaston K.J., *Effects of the Covid-19 lockdown on urban light emissions: Ground and satellite comparison*, Remote Sensing, 2021, 13, DOI: 10.3390/rs13020258.
- [45] Jechow A., Hölker F., *Evidence that reduced air and road traffic decreased artificial night-time skyglow during COVID-19 lockdown in Berlin, Germany*, Remote Sensing, 2020, 12, DOI: 10.3390/rs12203412.
- [46] Saadat S., Rawtani D., Hussain C.M., *Environmental perspective of COVID–19*, Science of The Total Environment, 2020, 728, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138870.
- [47] Le Quéré C., Jackson R.B., Jones M.W., Smith A.J.P., Abernethy S., Andrew R.M., De–Gol A.J., Willis D.R., Shan Y., Canadell J.G., *Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID–19 forced confinement*, Nature Climate Change, 2020, 10, s. 647–653, DOI: 10.1038/s41558–020–0797–x.
- [48] Lokhandwala S., Gautam P., *Indirect impact of COVID-19 on environment: A brief study in Indian context*, Environmental Research, 2020, 188, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109807.
- [49] Lecocq T., Hicks S.P., van Noten K., van Wijk K., Koelemeijer P., de Plaen R.S.M., Massin F., Hillers G., Anthony, R.E., Apoloner M.T., *Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures*, Science, 2020, 369, s. 1338–1343, DOI: 10.1126/science.abd2438.
- [50] Ścieżor T., *Effect of street lighting on the urban and rural night-time radiance and the brightness of the night sky*, Remote Sensing, 2021, 13, 9, DOI: 10.3390/rs13091654.
- [51] Województwo Małopolskie 2019 – Podregiony, Powiaty, Gminy, <https://krakow.stat.gov.pl/publikacje-ifoldery/roczniki-statystyczne/wojewodztwo-malopolskie-2019-podregiony-powiaty-gminy,7,16.html> (dostęp: 03.01.2022).

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

IMPACT OF THE COVID–19 PANDEMIC ON LIGHT POLLUTION OF THE NIGHT SKY

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

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

