

WERTYKALNA ZMIENNOŚĆ JASNOŚCI NOCNEGO NIEBA W TERENIE ZURBANIZOWANYM

DOI 10.34658/9788366741461.8

Dominika Karpińska

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

Mieczysław Kunz

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

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

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

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

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

1. Wstęp

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

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

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

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

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

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

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

2. Pomiar jasności nocnego nieba

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

2.1. Najczęściej stosowane metody pomiarowe jasności nocnego nieba

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

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

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

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

2.2. Autorskie urządzenie do pomiaru jasności nocnego nieba

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



Rys. 1. Automatyczne urządzenie pomiarowe własnej konstrukcji

Źródło: fot. Dominika Karpińska.

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

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

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

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

Tabela 1. Zestawienie parametrów skonstruowanego urządzenia

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

Źródło: opracowanie własne.

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

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

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

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

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

3.1. Metodologia pomiarów

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

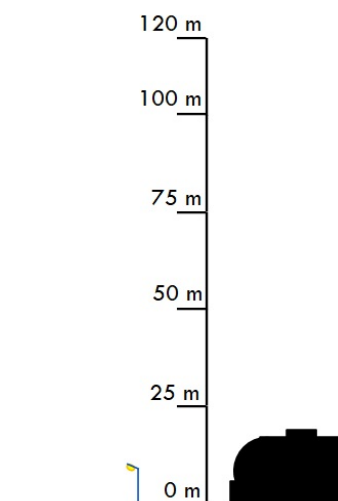


Rys. 2. Autorskie urządzenie pomiarowe zamontowane na pokładzie wielowirnikowca firmy DJI modelu Matrice 201 RTK

Źródło: fot. Dominika Karpińska.

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

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



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

Źródło: opracowanie własne.

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

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

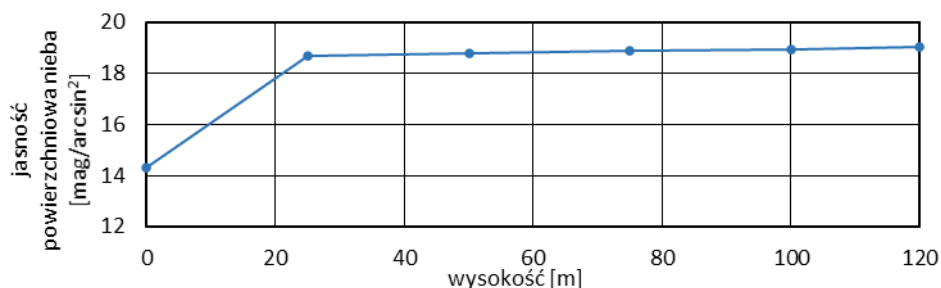
wcześniej w przeznaczonej do tego rodzaju BSP aplikacji DJI, tworząc najprostszą czworokątną zamkniętą trasę (rys. 4), w której w punktach węzłowych dokonywany był pomiar. Po zakończonym locie i pomiarze testowym zauważono liczne ograniczenia przyjętej metody akwizycji danych. Każdorazowe wznoszenie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



Rys. 4. Przedstawienie punktów węzłowych planu nalotu

Źródło: opracowanie własne.

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



Rys. 5. Wykres przedstawiający dane zebrane podczas pomiarów testowych

Źródło: opracowanie własne.

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

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

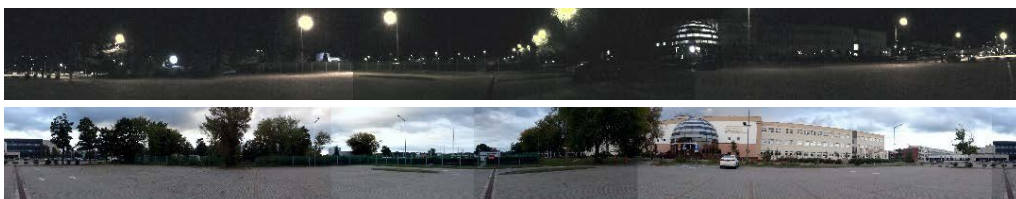
W zależności od warunków pogodowych (głównym elementem wpływającym na większe zużycie energii jest wiatr) niezbędny czas realizacji pełnych pomiarów w przyjętym cyklu działania na 16 poziomach wysokościowych szacowany był na około 20 minut. Przyjęte założenia okazały się słuszne i wszystkie zrealizowane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

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

3.2. Stanowiska pomiarowe

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

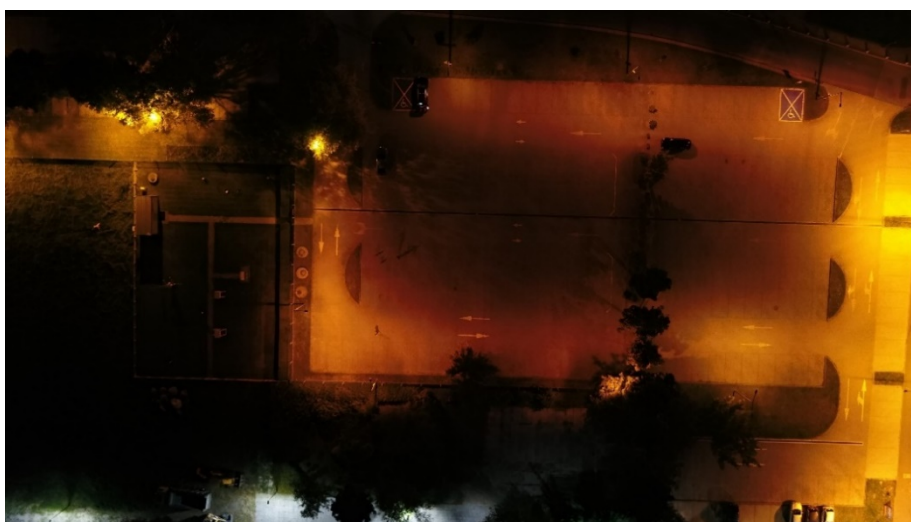
Pierwszym wybranym stanowiskiem pomiarowym był parking kampusu Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (rys. 6). Jest to stanowisko oddalone od ścisłego centrum miasta – Zespołu Staromiejskiego – o około 3 km. Wysokość punktu startowego wyniosła 48,6 m n.p.m., a dokładna lokalizacja w przestrzeni geograficznej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



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

Źródło: fot. Mieczysław Kunz.

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



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

Źródło: fot. Mieczysław Kunz.

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



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

Źródło: fot. Mieczysław Kunz.

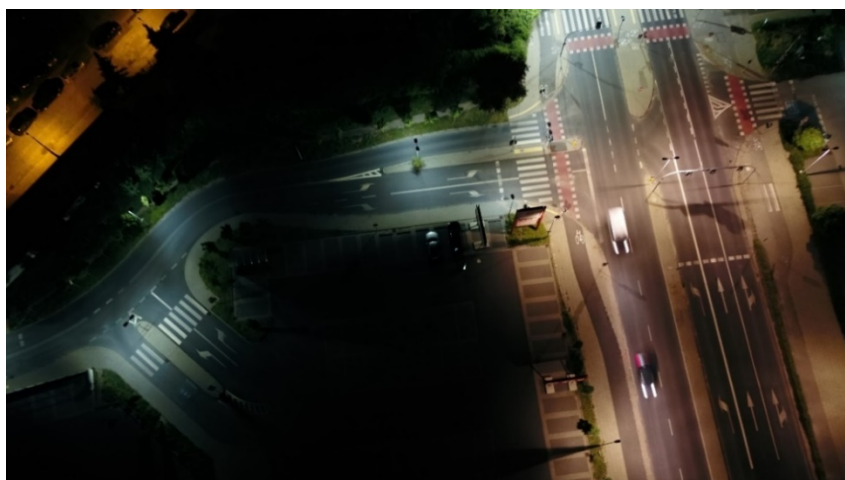
Drugim wybranym miejscem do realizacji pomiarów wertykalnych było stanowisko zlokalizowane na parkingu przed sklepem wielkopowierzchniowym przy ulicy Bema w Toruniu (rys. 9). Jest to stanowisko oddalone od ścisłego centrum miasta o około 1,5 km. Wysokość punktu startowego wynosiła 54,6 m n.p.m., a dokładna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



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

Źródło: fot. Dominika Karpińska.

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



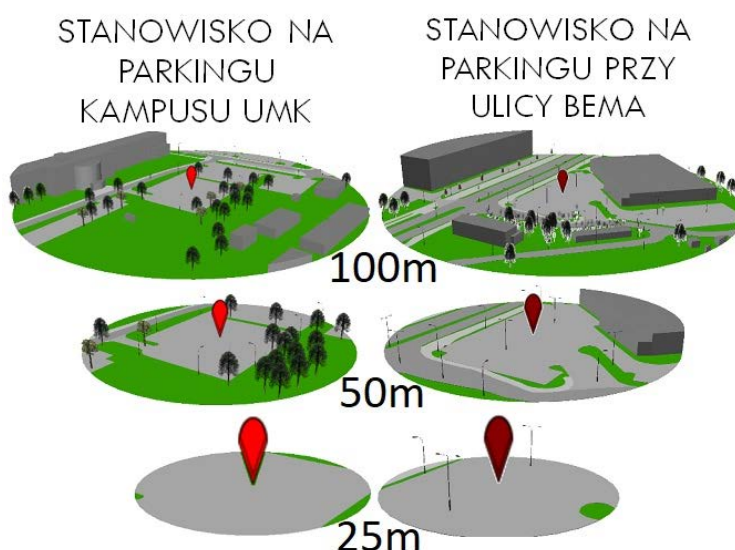
Rys. 10. Stanowisko pomiarowe na parkingu przy ul. Bema – pionowe zdjęcie wykonane z pokładu BSP z wysokości 100 m
Źródło: fot. Mieczysław Kunz.



Rys. 11. Otoczenie punktu pomiarowego na parkingu przy ul. Bema – ukośne zdjęcie wykonane z pokładu BSP z wysokości 5 m
Źródło: fot. Mieczysław Kunz.

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

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



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

Źródło: opracowanie własne.

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

4. Analiza wykonanych pomiarów w gradiencie wertykalnym

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

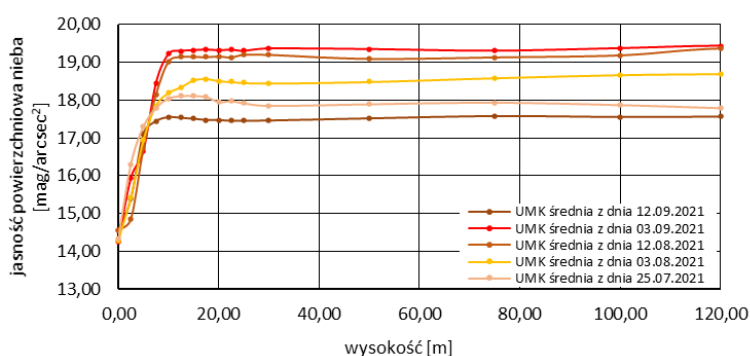
pomiarowych, w tym cztery na obu wytypowanych stanowiskach, a jedną – pierwszą, w której dokonywany został pomiar z wykorzystaniem BSP w cyklu, tylko na stanowisku zlokalizowanym na parkingu kampusu UMK w Toruniu. Sesje pomiarowe odbyły się w następujących terminach: 25 lipca, 3 sierpnia, 12 sierpnia,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

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

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

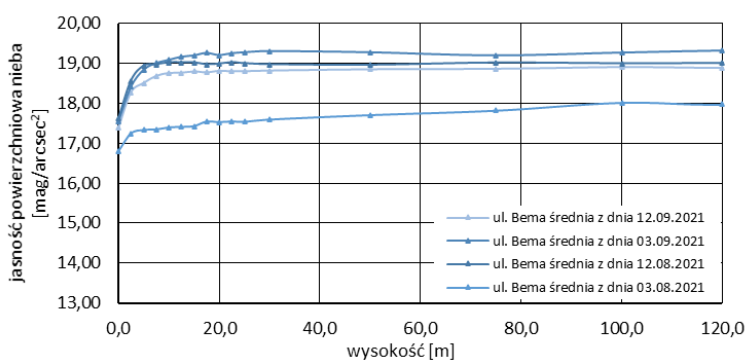
Podobna sytuacja jest pokazana na kolejnym wykresie (rys. 14), gdzie przedstawione są dane uzyskane na stanowisku pomiarowym położonym na parkingu przy ul. Bema w Toruniu. Tam również na wysokości około 10 m następuje stabilizacja wartości pomiarowych. Przy porównaniu dwóch przedstawianych wykresów (rys.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

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



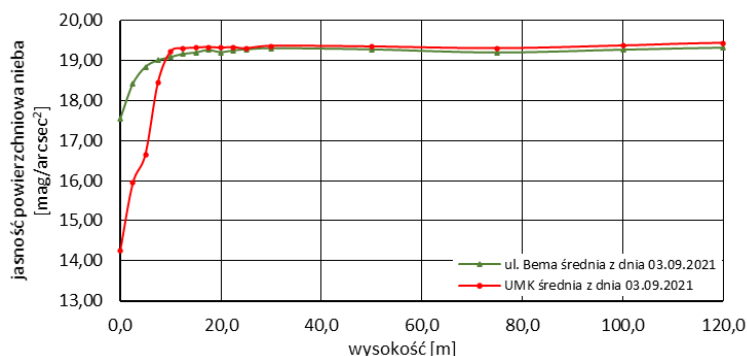
Rys. 13. Zestawienie uzyskanych wyników obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym na stanowisku pomiarowym zlokalizowanym na parkingu UMK w Toruniu

Źródło: opracowanie własne.



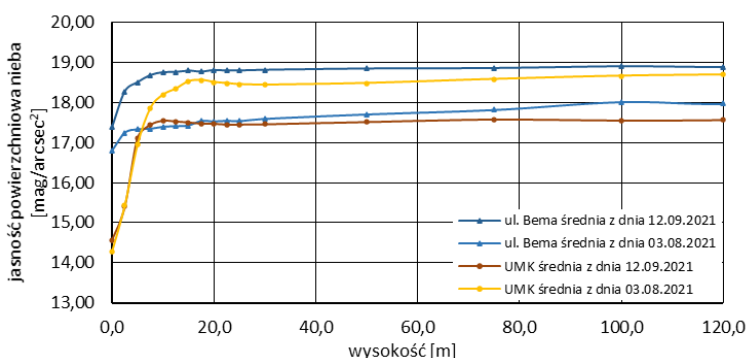
Rys. 14. Zestawienie uzyskanych wyników obrazujących zmienność jasności nocnego nieba w gradiencie pionowym na stanowisku pomiarowym zlokalizowanym na parkingu przy ul. Bema w Toruniu

Źródło: opracowanie własne.



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

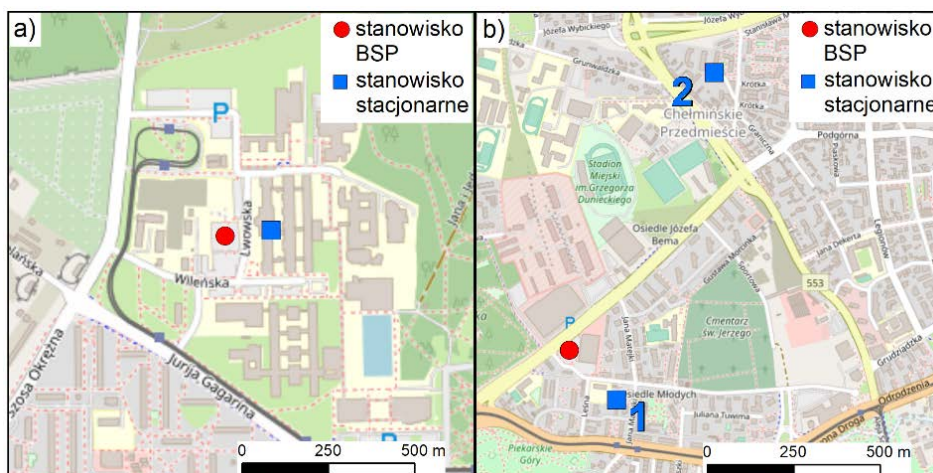
Źródło: opracowanie własne.



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

Źródło: opracowanie własne.

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



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

Źródło: opracowanie własne.

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

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

Źródło: opracowanie własne.

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

5. Wnioski i podsumowanie

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

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

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

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

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

Literatura

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

- [18] Kołomański S., Wiernasz A., Borodacz K., Białek R., Mikołajczyk P., *ALPS – stacje obserwacyjne zanieczyszczenia światłem* [w:] *Zanieczyszczenie światłem. Źródła, obserwacje, skutki*, A. Kotarba (red.), Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 2019, s. 153–166.
- [19] Karpińska D., Kunz M., *Analysis of light pollution of the night sky in Toruń (Poland)*, Civil and Environmental Engineering Reports, 2020, s. 155–172, DOI: 10.2478/ceer–2020–0057.
- [20] Karpińska D., Kunz M., *Light pollution in the night sky of Toruń in the summer season*, Bulletin of Geography. Physical Geography, 2019, 17, s. 91–100.
- [21] Karpińska D., Kunz M., *Analysis of the visibility and signal strength of the LoRaWAN network in an urbanized area on the example of the Bielany campus of the Nicolaus Copernicus University in Toruń*, Book of Abstracts, Third World Conference of the Society for Urban Ecology, Poznań, 2021, s. 143–144.
- [22] Karpińska D., Kunz M., *Rekonstrukcja zasięgu widoczności sieci LoRaWAN na terenie kampusu UMK w Toruniu* [w:] *Środowisko przyrodnicze jako obszar badań*, A. Młynarczyk (red.), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, 2021, s. 47–60.
- [23] Karpińska D., Kunz M., *Analysis of the visibility and signal strength of the LoRaWAN network in an urbanized area – a case study of the Bielany campus at the Nicolaus Copernicus University in Toruń*, Bulletin of Geography. Socio-Economic Series, 2021, 54, s. 137–149, DOI: 10.2478/bog–2021–0039.
- [24] Kunz M., *Nowoczesne metody i narzędzia telegеоinformatyczne służące pozyskiwaniu informacji geograficznej* [w:] *Systemy informacji geograficznej w zarządzaniu obszarami chronionymi – od teorii do praktyki*, M. Kunz, A. Nienartowicz (red.), Wyd. FUH DANIEL, Tuchola – Toruń, 2015, ss. 85–96.
- [25] Ścieżor T., *Metody pomiaru jasności nocnego nieba*, Sekcja Ochrony Ciemnego Nieba Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii, <http://lightpollution.pk.edu.pl/SOCN/metody.php> (dostęp: 10.12.2021).
- [26] Kołomański S., *Zanieczyszczenie światłem i ciemność* [w:] *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, M. Roge–Wiśniewska, K. Tomasik (red.), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 2015, s. 29–46.
- [27] Ścieżor T., *Określenie charakteru zmian jasności nocnego nieba w Polsce w latach 1994–2009 na podstawie amatorskich obserwacji komet* [w:] *Przejdź na ciemną stronę nocy. Środowiskowe i społeczne skutki zanieczyszczenia światłem*, M. Roge–Wiśniewska, K. Tomasik (red.), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 2015, s. 61–80.
- [28] Hänel A., Posch T., Ribas S.J., Aubé M., Duriscoe D., Jechow A., Kolláth Z., Lolkema D.E., Moore C., Schmidt N., Spoelstra H., Wuchterl G., Kyba C.C.M., *Measuring night sky brightness: methods and challenges*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 205, s. 278–290, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008.
- [29] Kolláth Z., *Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park*, Journal of Physics Conference Series, 2010, 218, 1, art. 012001, DOI: 10.1088/1742–6596/218/1/012001.
- [30] Pun C.S.J., So C.W., Leung W.Y., Wong C.F., *Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 139, s. 90–108, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.014.
- [31] Ścieżor T., *Naturalne i antropogeniczne czynniki łuny świetlnej nocnego nieba*, Monografie Politechniki Krakowskiej, 2018, s. 71–83.

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

VERTICAL VARIABILITY OF THE NIGHT SKY BRIGHTNESS IN URBANIZED AREAS

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

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

