

TOMASZ ŚCIEŻOR, MAREK KUBALA

*Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Krakowska
Warszawska 24, 31-155 Kraków
E-mail: sciezor@vistula.pk.edu.pl
mq@vistula.pk.edu.pl*

WPLYW ZAPYLENIA ATMOSFERY NA JASNOŚĆ NOCNEGO NIEBA

WSTĘP

Głównym czynnikiem wpływającym na zwiększenie jasności nocnego nieba przez światło sztuczne są chmury odbijające wadliwie ukierunkowane światła naziemne (ŚCIEŻOR i współaut. 2010, KYBA 2011). Czynnikiem ten zdecydowanie dominuje nad innymi powodując, że oświetlenie powierzchni Ziemi w warunkach całkowitego zachmurzenia często przekracza oświetlenie przez Księżyc (KUBALA i współaut. 2009). Istnieją jednak również czynniki atmosferyczne rozpraszające światła sztuczne na niebie bezchmurnym. Takim, opisywanym już w literaturze czynnikiem, istotnym zwłaszcza w zakresie podczerwieni, jest para wodna zawarta w przyziemnych warstwach atmosfery, skraplająca się nawet do mgły, której silny efekt rozjaśniający został już opisany (ŚCIEŻOR i współaut. 2010). Jest to jedna z przyczyn lokowania obserwatoriów astronomicznych na szczytach gór, w rejonach o niskiej wilgotności atmosfery (KERBER 2014).

W trakcie prowadzonego stałego monitoringu poziomu zanieczyszczenia świetlnego w Krakowie i okolicach w okresie od listopada 2008 do stycznia 2010 r. stwierdzono, że w miesiącach zimowych nocne niebo jest jaśniejsze niż w miesiącach letnich (ŚCIEŻOR

i współaut. 2010). Jest to sprzeczne z oczekiwaniami, jak również z wcześniejszymi badaniami prowadzonymi w północnych, wolnych od zanieczyszczenia świetlnego, obszarach Polski (ŚCIEŻOR 2013). W północnych szerokościach geograficznych w miesiącach letnich Słońce znajduje się w nocy płytko pod horyzontem, rozjaśniając nocne niebo i wywołując efekt astronomicznych białych nocy, w przeciwieństwie do miesięcy zimowych (ŚCIEŻOR 2013). Poszukując przyczyny obserwowanej w Krakowie i okolicach odwrotnej zależności jasności nocnego nieba od pory roku, zwrócono uwagę na podobny charakter sezonowych zmian stężenia pyłów zawieszonych w atmosferze. Źródłem tych pyłów w okresie zimowym jest przede wszystkim niska emisja pochodząca z systemów grzewczych gospodarstw domowych, opalanych najczęściej węglem lub pyłem węglowym. W ramach prowadzonych badań sprawdzono zależność między stężeniem pyłów zawieszonych a jasnością nocnego, bezchmurnego nieba zarówno na terenie aglomeracji krakowskiej, jak również na obszarach chronionych Gorczańskiego Parku Narodowego.

HISTORIA POMIARÓW

Pierwsze pomiary sztucznej poświaty niebieskiej sięgają wczesnych lat 70. XX w. (WALKER 1970, 1977; TREANOR i SALPETER 1972; BERRY 1976). Pomiary te miały głównie na celu albo weryfikację, albo stworzenie empirycznego modelu zanieczyszczenia świetlnego wokół dużych ośrodków miejskich, a także opartych na tych modelach map zanieczyszczenia świetlnego na danym terenie (WALKER 1970, BERTIAU i współaut. 1973, BERRY 1976).

W latach 1987-1989 przeprowadzono pomiary jasności nocnego nieba w 149 lokalizacjach na prawie całym obszarze Japonii (KOSAI i ISOBE 1991, ISOBE i KOSAI 1998). Podobne pomiary, z wykorzystaniem metod i doświadczeń japońskich, ale na mniejszą skalę, były prowadzone w Holandii, w latach 1992 (metodą fotograficzną) i 1997 (metodą obserwacyjną) (SCHREUDER 2001), jak również w okolicach Katanii na Sycylii (CRISTALDI i FOTI 2000) w 1991 r.

Na terenie Stanów Zjednoczonych przeprowadzono pomiary w 11 obszarach chronionych (parki narodowe i rezerwy) wokół Las Vegas w Nowadzie i Flagstaff w Arizonie (DURISCOE i współaut. 2007). Również tam rezultatem pomiarów były mapy konturowe jasności nieba w punktach pomiarowych.

Pojawienie się tanich elektronicznych czujników światła o wysokiej czułości umożliwiło przeprowadzanie małym kosztem pomiarów terenowych zanieczyszczenia świetlnego, bez angażowania drogiej czy nieporęcznej aparatury. Na ich bazie, kanadyjska firma Unihedron stworzyła prosty w obsłudze model miernika jasności powierzchniowej nocnego nieba, Sky Quality Meter (SQM). Pozwoliło to na angażowanie w przedsięwzięcia pomiarowe ochotników.

Jednym z pierwszych przedsięwzięć pomiarowych na większą skalę, z użyciem mierników SQM, był pomiar jasności nocnego nieba na terenie Zselic Landscape Protection Area na południe od Kaposvár na Węgrzech (KOLLATH 2008). Pomiary miały na celu z jednej strony sprawdzenie przydatności mierników SQM do tego typu działań, z drugiej zaś,

zmierzenie jakości nocnego nieba w nowo założonym obszarze ochrony nocnego nieba. Pomiary te są nadal prowadzone (KOLLATH 2010).

Kolejną akcją pomiarową z użyciem SQM były pomiary terenowe zanieczyszczenia świetlnego na obszarze Hong Kongu i okolic, prowadzone przez Wydział Fizyki miejscowego uniwersytetu. Pomiary były wykonywane przez grupę ochotników (marzec 2008 - maj 2009), również w warunkach częściowego lub całkowitego zachmurzenia czy zamglenia. Ponadto, pomiary zanieczyszczenia świetlnego porównywane były z danymi jakości powietrza. Autorom raportu nie udało się jednak wykazać żadnych wyraźnych korelacji. Końcowym efektem pomiarów było stworzenie mapy zanieczyszczenia świetlnego Hong Kongu i okolic, a także opublikowania raportu (PUN i So 2012).

W tym samym czasie (listopad 2008-styczeń 2010) podobne pomiary z użyciem SQM prowadzone były na obszarze aglomeracji krakowskiej przez Pracownię Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego działającą przy Instytucie Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej. Raport z pomiarów został opublikowany w monografii (ŚCIEŻOR i współaut. 2010). Pomiary ujawniły m.in. korelacje jasności zanieczyszczonego świetlnie nocnego nieba z pokrywą śnieżną, zachmurzeniem i stężeniem pyłów zawieszonych. Ten sam zespół przeprowadził podobne pomiary dla obszarów górskich południowej Polski (ŚCIEŻOR i współaut. 2012). Efektem prowadzonych pomiarów było stwierdzenie zależności jasności nocnego, bezchmurnego nieba od stężenia pyłów zawieszonych (ŚCIEŻOR i KUBALA 2014).

Bardziej zaawansowane pomiary za pomocą mierników z rodziny SQM były prowadzone w Berlinie przez zespół KYBA i współaut. (2012). Pomiary te miały na celu zbadanie zmian w widmie sztucznej poświaty niebieskiej dla różnych zakresów długości fali oraz ich zależności od pokrywy chmur.

SZCZEGÓŁY POMIARÓW

Pomiary jasności nocnego nieba wykonywano za pomocą prostego w obsłudze

miernika jakości nocnego nieba Sky Quality Meter (SQM). SQM jest mikroprocesorowym

przetwornikiem sygnału częstotliwościowego czujnika jasności TSL237, produkowanego przez Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc. Mikroprocesor miernika SQM został tak oprogramowany, że odczyt z czujnika jest przeliczany na powszechnie używane w ocenie jakości nocnego nieba jednostki jasności powierzchniowej magnitudo na sekundę łuku do kwadratu ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$).

Mierniki SQM produkowane są w kilku wersjach. W opisywanych pomiarach wykorzystywano głównie wyzwalane ręcznie mierniki SQM-L (10 mierników), które w stosunku do wersji SQM różnią się, dzięki zastosowaniu prostego układu optycznego, węższym kątem zbierania światła, a zatem są przydatniejsze w mieście. Mierniki SQM posiadają kąt zbierania do 60° od osi przyrządu, natomiast dla SQM-L kąt ten wynosi zaledwie 20° , co ułatwia pomiar w warunkach miejskich, charakteryzujących się dużą ilością naziemnych źródeł światła, mogących wpływać bezpośrednio na wynik pomiaru standardowym miernikiem SQM.

Pomiary były prowadzone, w miarę możliwości, codziennie, w każdych warunkach pogodowych, w okresie między godzinami 22 i 2 czasu lokalnego. Do dalszej analizy

wybrano jedynie pomiary wykonywane w czasie bezchmurnej i bezksiężycowej nocy (faza Księżyca mniejsza od 30%) oraz przy braku widocznego zamglenia, ocenianego na podstawie widzialności poziomej obiektów odległych (widzialność pozioma powyżej 20 km).

Pomiar wykonywany był miernikiem skierowanym w stronę zenitu, w miejscu, gdzie nie docierało bezpośrednio światło latarni i żadne źródło światła nie znajdowało się w polu widzenia przyrządu, oraz, gdzie obszar nieba, z którego zbierane było światło przez miernik (w kącie do 20° od zenitu) nie był przysłonięty żadnymi przeszkodami (np. korony drzew, ściany budynków itp.).

Stwierdzono, że przy spełnieniu tych wymagań w stabilnych warunkach pogodowych różnice odczytów pomiędzy kolejnymi pomiarami nie przekraczają $0,02 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$, z wyjątkiem wietrznych nocy, gdy dokładność ta spadała do $0,05 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. W związku z powyższym kontrolnie za każdym razem wykonywano serię pięciu pomiarów, z których zapisywano wartość średnią, zaokrągloną do $0,1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. Dokładność tę uznano za wystarczającą do założonych celów.

STOSOWANE JEDNOSTKI

Jasność powierzchniowa nocnego nieba S_a podawana jest w powszechnie używanych w astronomii jednostkach magnitudo na sekundę łuku do kwadratu ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). Jest to skala pochodna względem skali magnitudo (mag , wielkość gwiazdowa, m), określającej wizualne wrażenie jasności gwiazdy jako źródła punktowego. Skala magnitudo jest skalą logarytmiczną, względną i odwrotną, w której obiekt o jasności 0 mag jest jaśniejszy 100 razy od obiektu o jasności 5 mag . Skala $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ określa jasność powierzchniową obiektów astronomicznych rozciągłych, takich jak mgławice, galaktyki, komety czy właśnie tło nieba. Jednostką jasności powierzch-

niowej w układzie SI jest kandela na metr kwadratowy (cd/m^2). Zależność pomiędzy tymi wielkościami opisuje wzór:

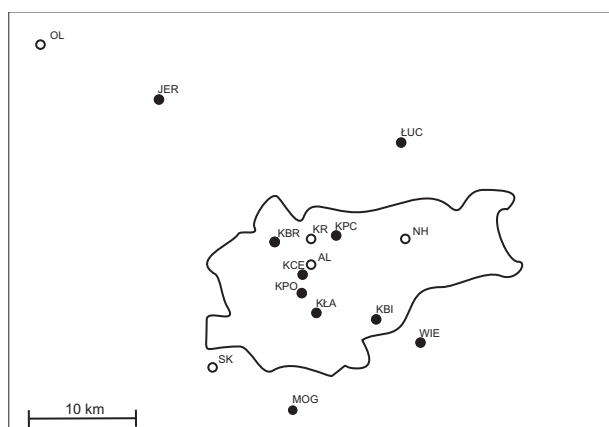
$$(\text{cd}/\text{m}^2) = 10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-0,4 \cdot (\text{mag}/\text{arcsec}^2)}$$

W związku z niską jasnością powierzchniową nocnego nieba stosowaną jednostką jest w tym przypadku milikandela na metr kwadratowy (mcd/m^2). Ze względu na odniesienie do innych publikacji dotyczących jasności nocnego nieba, jak również do odczytów z mierników SQM, w dalszej części pracy będziemy się posługiwać przede wszystkim skalą ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$), podając jednocześnie odpowiednie wartości w skali (mcd/m^2).

STATYSTYKA POMIARÓW

Pomiary jasności nocnego nieba (S_a) prowadzone były, począwszy od połowy listopada 2008 r. do początku stycznia 2010 r., na dziesięciu stanowiskach stacjonarnych zlokalizowanych zarówno w granicach administra-

cyjnych Krakowa, jak również w obszarach podmiejskich (Ryc. 1). W obrębie miasta najbliższe centrum znajdowało się stanowisko na bulwarach w zakolu Wisły pod Wawelem (KCE). Trzy stanowiska usytuowane były na



Ryc. 1. Położenie stacji pomiarowych jasności nocnego nieba S_n (symbole wypełnione) i stężenia pyłów zawieszonych PM₁₀ (symbole puste). Linia ciągła oznacza granice administracyjne Krakowa.

dużych osiedlach mieszkaniowych: na osiedlu Podwawelskim w pobliżu centrum miasta (KPO), na osiedlu Prądnik Czerwony w północnej jego części (KPC) oraz na osiedlu Bieżanów Nowy na wschodnim obrzeżu Krakowa, w pobliżu węzła wielickiego obwodnicy krakowskiej (KBI). Kolejne stanowiska w obrębie miasta znajdowały się: na terenie ogródków działkowych w pobliżu osiedla Bronowice Nowe w północno-zachodniej części miasta (KBR) oraz w pobliżu pętli tramwajowej Kraków-Łagiewniki, w dzielnicy mocno uprzemysłowionej położonej przy trasie zakopiańskiej (KŁA). Dwa stanowiska znajdowały się już poza administracyjnymi granicami Krakowa: w Wieliczce na terenie zabudowy domów jednorodzinnych (WIE)

oraz w Mogilanach na południe od Krakowa przy trasie zakopiańskiej (MOG). Dwa ostatnie, bardziej oddalone, znajdowały się: w Łuczycach 14,6 km na północny wschód od centrum Krakowa (ŁUC) i, najdalsze, w Jerzmanowicach 21,5 km na północny zachód od centrum, przy trasie olkuskiej (JER). Łącznie, w opisywanym okresie wykonano 2985 pomiarów, z czego wymagane warunki (noc bezksiężycowa, bezchmurna i w widzialności poziomą przekraczającą 10 km) spełniały 363 noce. Na poszczególnych stanowiskach pomiarowych było to 29 nocy (KCE), 50 nocy (KPO), 70 nocy (KPC), 38 nocy (KBI), 32 noce (KBR), 29 nocy (KŁA), 39 nocy (WIE), 44 noce (MOG), 22 noce (ŁUC) i 14 nocy (JER).

Od 6 kwietnia 2012 r. aż do tej pory analogiczne pomiary wykonywane są w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Pedagogicznego im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, znajdującym się na górze Suhora (SUH) na obszarze Gorczańskiego Parku Narodowego na wysokości 1000 m n.p.m. w odległości 42 km na SE od stanowiska MOG. Łącznie, w opisanym okresie wykonano tam 242 pomiarów, w tym 58 spełniających podane warunki.

W pracy wykorzystano również wieloletnie średnie roczne jasności nocnego nieba na stanowisku znajdującym się na obrzeżach Wałbrzycha na Dolnym Śląsku (WAL), otrzymane poprzez użycie własnej metody kometarnej (ŚCIEŻOR 2013). Spośród 164 obserwacji komet, wykonanych na tym stanowisku w latach 1996–2004, w celu wyznaczenia jasności nocnego nieba wykorzystano 54 obserwacji nadające się do tego celu.

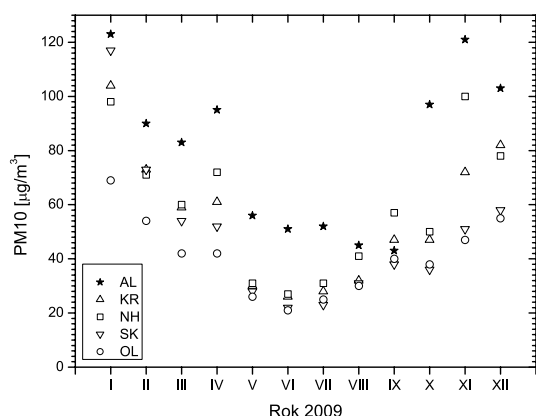
ZMIANY SEZONOWE KONCENTRACJI PYŁU ZAWIESZONEGO

Wartości stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀¹ mierzone są na kilku stacjach pomiarowych w Krakowie i okolicach. Wyniki pomiarów publikowane są co miesiąc w biuletynach WIOŚ, dostępnych w Internecie (<http://www.krakow.pios.gov.pl/biuletyn.php>). Niestety, położenie stacji pomiarowych nie pokrywa się z położeniem wcześniej opisanych stanowisk pomiarowych zanieczyszczenia świetlnego (Ryc. 1). Zachodziła obawa, że podawanych w biuletynach wartości PM₁₀ dla tych stacji nie moż-

na będzie odnieść do stanu atmosfery w punktach pomiaru jasności nocnego nieba.

W związku z powyższym powstała konieczność wzajemnego porównania sezonowych zmian stężenia PM₁₀ dla tych stacji. Porównanie to miało na celu odpowiedzenia na dwa pytania: jakościowe – czy sezonowe zmiany stężenia PM₁₀ mają ten sam charakter na wszystkich stacjach, oraz ilościowe – czy mierzone na poszczególnych stacjach wartości PM₁₀ są do siebie zbliżone?

¹PM₁₀ (ang. particulate matter 10), frakcja aerozoli atmosferycznych, zawierająca wszystkie cząstki o wielkości 10 mikrometrów lub mniejszej, w skład których wchodzi zwykle stosunkowo obojętne chemicznie związki takie jak krzemionka i tlenki metali.



Ryc. 2. Zmiany czasowe stężenia pyłów zawieszonych PM10 w kolejnych miesiącach 2009 r. dla wszystkich stacji pomiarowych WIOŚ w Krakowie i okolicach.

Do analizy wykorzystano dane uśrednione dla kolejnych miesięcy 2009 r., opublikowane w kolejnych zeszytach Biuletynu WIOŚ. Na podstawie wykresu wartości PM10 w kolejnych miesiącach roku dla pięciu stacji pomiarowych, położonych najbliższych punktów pomiarowych zanieczyszczenia świetlnego można stwierdzić, że charakter zmian wartości PM10 na wszystkich stacjach w ciągu roku jest taki sam, a nawet same wartości są zbliżone (Ryc. 2). Wyjątkiem jest stacja Aleje (AL), położona na pasie zieleni znajdującym się między dwoma pasmami ruchu Alei Krasieńskiego, gdzie dominują zanieczyszczenia komunikacyjne i dla której wartości PM10 częściowo odbiegają od pozostałych, chociaż charakter zmian jest podobny. Do dalszej analizy wyznaczono wartości stężeń PM10 dla wszystkich wspomnianych stacji, z wyłączeniem stacji AL.

Na Ryc. 2 można zauważyć, że stężenie pyłu zawieszzonego w miesiącach zimowych (grudzień, styczeń) jest dla czterech wybranych stacji około pięć razy wyższe, niż w miesiącach letnich, co oczywiście związane jest z tzw. „niską emisją”² pyłów pochodzącą głównie z opalanych węglem systemów grzewczych. Jak wiadomo, Kraków znajduje się w ścisłej czołówce miast europejskich pod względem zanieczyszczenia powietrza niską emisją w okresie zimowym (BIELEC-BAKOWSKA i współaut. 2011, EEA REPORT 2013). W miesiącach letnich war-

tości stężeń PM10 dla poszczególnych stacji są praktycznie identyczne i wynoszą ok. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (maksymalne odchylenie od wartości średniej wynosi 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). W miesiącach zimowych wzajemne różnice wzrastają, w zależności od położenia stacji pomiarowej w obrębie aglomeracji krakowskiej. Wyraźnie można wyróżnić stacje położone w obrębie miasta, na wysokości 210 m n.p.m. [Nowa Huta (NH), Krowodrza (KR), określane dalej jako stacje M] od stacji znajdujących się na obszarach pozamiejskich, poza obniżeniem krakowskim na wysokości 369 m n.p.m. i 245 m n.p.m. [odpowiednio Olkusz (OL) i Skawina (SK), określane dalej jako stacje W]. Wewnątrz tych dwu grup maksymalne odchylenie od wartości średniej w okresie zimowym również wynosi 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pomimo różnic między wartościami PM10 dla grup M i W można jednak zauważyć, że charakter zmian sezonowych na wszystkich analizowanych stacjach pomiaru PM10 jest ten sam i, co zauważono już wcześniej (ŚCIEŻOR i współaut. 2010), przypomina sezonowe zmiany średnich miesięcznych jasności nocnego, bezchmurnego nieba.

Na podstawie położenie (miasto-wieś), do dalszej analizy zmian jasności nocnego nieba, jako źródła danych o stężeniu PM10 dla stanowisk KPO, KBR, KŁA, KPC, KBI oraz KCE, wybrano stacje M, natomiast dla WIE, MOG, JER i LUC wybrano stacje W.

W przypadku stanowiska SUH, jak dotąd w okolicy nie została uruchomiona żadna stacja pomiaru stężenia pyłu zawieszzonego, w związku z czym wykorzystano średnie miesięczne wartości stężenia pyłów PM10 wyznaczone dla tego punktu w latach 2012–2013 za pomocą modelu FAPPS (GODŁOWSKA i współaut. 2012, HAJTO i współaut. 2012, www.smog.imgw.pl).

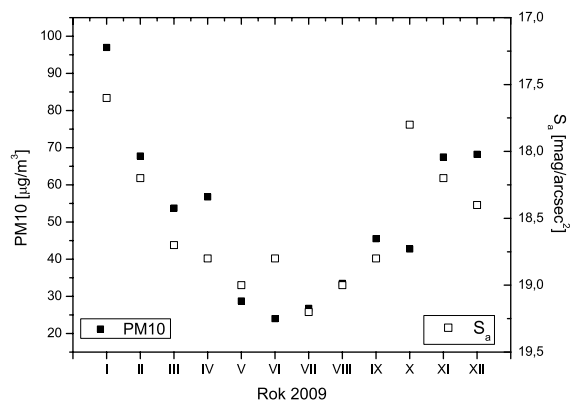
W przypadku stanowiska WAL wykorzystano jedyne dostępne średnie roczne stężenia pyłu zawieszzonego ogółem (TSP³), wyznaczone w odległości zaledwie 2 km na stacji pomiarowej WL w latach 1996–2004 (WIOŚ Wałbrzych). Wykazane w tym przypadku zależności S_a od TSP mogą być porównywane z zależnościami S_a od PM10 na innych stanowiskach, w związku ze znaną liniową korelacją wartości TSP z PM10 (KERMANI 2003); zwykle wartość proporcji PM10/TSP określa się na około 0,5 (THRALL i HUDISHEVSKY 1984, HO i NIELSEN 2007).

²Niska emisja – emisja komunikacyjna, jak również emisja pyłów i szkodliwych gazów pochodząca z lokalnych kotłowni węglowych i domowych pieców grzewczych, w których spalanie węgla odbywa się w nieefektywny sposób, najczęściej węglem tanim, a więc o złej charakterystyce i niskich parametrach grzewczych.

³TSP (ang. total suspended particulates), całkowity pył zawieszony, czyli wszystkie aerozole, o średnicy cząstek zarówno poniżej, jak i powyżej 10 mikrometrów.

WPLYW ZAPYLENIA NA JASNOŚĆ NIEBA

Na wspólnym wykresie zmian sezonowych uśrednionych miesięcznie jasności nocnego, bezchmurnego nieba, zmierzonej przy pomocy mierników SQM (S_a), oraz średniego miesięcznego stężenia pyłów zawieszonych PM10, wyraźnie widoczne jest jakościowe podobieństwo tych zmian (Ryc. 3).



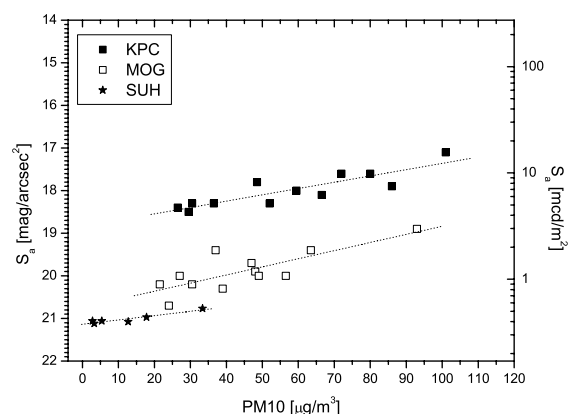
Ryc. 3. Jakościowe porównanie zmian czasyowych średnich miesięcznych wartości S_a i PM10 w kolejnych miesiącach 2009 r.

W celu sprawdzenia charakteru tego podobieństwa, wykonano wykresy zależności średniej miesięcznej wartości S_a dla bezchmurnych i bezksiężycowych nocy w poszczególnych punktach pomiarowych grup M i W, od średniego miesięcznego stężenia pyłów zawieszonych, zmierzonego na wcześniej opisanych stacjach pomiarowych WIOŚ. Na wykresie umieściliśmy również wartości S_a wyznaczone na stanowisku SUH w funkcji średniego miesięcznego PM10 określonego z modelu FAPPS (Ryc. 4).

Na przedstawionych wykresach wyraźnie widoczna jest liniowa zależność S_a od PM10. Wraz ze wzrostem stężenia pyłu zawieszonego w atmosferze od zera do wartości maksymalnej (ok. 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), wartość S_a może zmaleć nawet o ponad 1 mag/arcsec², co oznacza prawie trzykrotny liniowy wzrost jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba. Widoczne jest, że zależność ta jest praktycznie identyczna między stanowiskami z grupy M i W oraz można ją opisać jako zależność liniową typu $y=ax+b$, w której wartość b jest równa największej zarejestrowanej w danym punkcie pomiarowym wartości S_a (co odpowiada najciemniejszemu niebu), określanej dalej jako wartość bazowa

S_b . Współczynnik kierunkowy a , oznaczony dalej jako PMS, jest parametrem związanym z rozproszeniem światła na pyłe zawieszonym (Tabela 1).

W przypadku stanowiska SUH różnica wartości S_a między miesiącami zimowymi i letnimi wynosi zaledwie 0,3 mag/arcsec², co



Ryc. 4. Przykładowa średnia miesięczna wartość S_a w zależności od średniej miesięcznej wartości PM10 dla stanowisk pomiarowych w Krakowie (KPC), w Mogilanach (MOG) oraz w Gorczańskim Parku Narodowym (SUH). Linie punktowane ukazują tendencje zmian dopasowane metodą regresji liniowej dla każdego stanowiska pomiarowego.

jest wartością znacznie niższą, niż w przypadku miasta i jego okolic. Podobnie jak poprzednio, efekt ten powiązano z rozpraszaniem światła na pyłach zawieszonych, pochodzących z niskiej emisji systemów grzewczych domów w okolicznych miejscowościach. Należy pamiętać o tym, że najbliższe osady są położone w odległości zaledwie 3 km od obserwatorium, natomiast miasta, takie jak Rabka, a zwłaszcza Nowy Targ, znajdują się w odległości tylko 10 km, a lokalizację stanowiska charakteryzuje napływ zanieczyszczeń z obszarów sąsiednich (CIEŚLA i BRYJA 2010). Co ciekawe, współczynnik PMS ma wartość zbliżoną do otrzymanego na stanowiskach z miejskich grup M i W (Tabela 1). Zależność ta wymaga jednak dokładnych badań, których przeprowadzenie planuje się w najbliższym czasie, po zainstalowaniu stacji pomiaru PM10 we wspomnianych powyżej miastach.

Analogiczna analiza przeprowadzona dla stanowiska WAL wykazała, że również w

Tabela 1. Parametry zależności liniowej S_a vs PM10

Locality	Code	PMS	S_b
Kraków	KBI	-0,010	19,1
	KBR	-0,023	18,4
	KCE	-0,016	19,0
	KLA	-0,016	19,0
	KPC	-0,013	18,8
	KPO	-0,014	18,7
Wieliczka	WIE	-0,021	19,5
Mogilany	MOG	-0,015	20,6
Łuczyce	LUC	-0,016	20,6
Jerzmanowice	JER	-0,029	21,0
Suhora	SUH	-0,010	21,1
Wałbrzych	WAL	-0,107*	24,0*

*wartości otrzymane w przypadku wykorzystania danych TSP

tym przypadku wyraźnie widoczna jest liniowa zależność, tym razem S_a od TSP. Wraz ze wzrostem całkowitego stężenia pyłu zawieszonego w atmosferze od $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ do $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wartość S_a zmniejsza się o $1,43 \text{ mag}/\text{arc}\text{-sec}^2$, co oznacza prawie czterokrotny liniowy wzrost jasności powierzchniowej nocnego, bezchmurnego nieba. Jednocześnie widoczna jest wyraźnie większa wartość PMS, co jest zapewne związane z innym, niż w regionie krakowskim, przemysłowym pochodzeniem pyłu zawieszonego. Z kolei wartość S_b , zdecydowanie wyższa niż w poprzednich przypadkach, wynika z zastosowania tym razem metody kometarnej do określania wartości S_a (ŚCIEŻOR 2013).

Analiza statystyczna otrzymanych wyników wykazała, że w każdym badanym przypadku korelacje między jasnością nocnego, bezchmurnego nieba a koncentracją pyłów zawieszonych są wysoce istotne (ŚCIEŻOR i KUBALA 2014).

PODSUMOWANIE

Stwierdzono liniową zależność między stężeniem pyłu zawieszonego (PM10 lub TSP) a wartością S_a , określającą jasność nocnego, bezchmurnego nieba. Wyznaczone zależności liniowe pozwalają na prognozowanie w danym punkcie pomiarowym jakości nieba w zależności od stanu zapylenia atmosfery, mierzonego na stacjach meteorologicznych. Wyznaczone zależności pozwalają na określenie spodziewanej w danym punkcie jasności nieba w warunkach idealnych, danej poprzez wartość S_b .

Zagadnienie korelacji S_a i stężenia pyłu zawieszonego TSP lub PM10 wymaga stworzenia i wykorzystania odpowiedniej bazy pomiarowej wartości dla innych miast i będzie przedmiotem dalszych badań.

Niestety, nie przeprowadzono jak dotąd analogicznych, tak kompleksowych, sezonowych pomiarów S_a dla innych miejsc w Polsce, w których jednocześnie jest oznaczane stężenie pyłu zawieszonego. W niektórych przypadkach możliwe jest jednak wykorzystanie archiwalnych obserwacji astronomicznych, co powinno umożliwić odtworzenie wieloletnich zmian średniej rocznej wartości S_a nocnego, bezchmurnego nieba (ŚCIEŻOR 2013).

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że nawet w przypadku obszaru chronionego położonego w terenie górskim, jednak opodal ośrodków miejskich, widoczny jest wyraźny wpływ pyłów zawieszonych na jasność nocnego, bezchmurnego nieba, zwłaszcza w okresie zimowym.

LITERATURA

- BERRY R. L., 1976. *Light Pollution in Southern Ontario*. J. Royal Astronomical. Soc. Canada 70, 97-115
- BERTIAU F. C., DE GRAEVE E., TREANOR P. J., 1973. *The artificial night-sky illumination in Italy*. Vatican Observ. Publ. 1, 159-179.
- BIELEC-BAKOWSKA Z., KNOZOVÁ G., LEŚNIOK M., MATUSZKO D., PIOTROWICZ K., 2011. *High suspended dust concentrations in Brno, Sosnowiec and Krakow (the year 2009 as an example)*. Prace Geograficzne, IGiGP UJ 126, 67-84.
- CIEŚLA G., BRYJA A., 2010. *Sprawozdanie z badań zanieczyszczenia powietrza metodą wskaźnikową w zakresie NO2 i SO2 w ramach monitoringu regionalnego w 2009 roku*. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie, Delegatura w Nowym Sączu, Nowy Sącz
- CRISTALDI S., FOTI S., 2000. *A method to measure the night sky luminosity*. Memorie della Societa Astronomica Italiana, 71, 167-192.
- DURISCOE D. M., LUGINBUHL C. B., MOORE C., 2007. *Measuring night-sky brightness with a wide-field*

- CCD camera. Publ. Astronom. Soc. Pacific 119, 192–213.
- EEA REPORT 2013. *Air quality in Europe - 2013 report*. European Environment Agency, URL: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2013>.
- GODŁOWSKA J., KASZOWSKI W., HAJTO M. J., TOMASZEWSKA A. M., 2012. *Wpływ sposobu przygotowania meteorologicznych danych wejściowych w systemie FAPPS na jakość pola wiatru i głębokości mieszania. Konsekwencje dla prognozy PM10*. [W:] *Ochrona powietrza w teorii i praktyce T.2*. KONIECZYŃSKI J. (red.). Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Zabrze, 75–88.
- HAJTO M. J., GODŁOWSKA J., KASZOWSKI W., TOMASZEWSKA A. M., 2012. *System prognozowania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń powietrza FAPPS – założenia, możliwości, rozwój* [W:] *Ochrona powietrza w teorii i praktyce T.2*. KONIECZYŃSKI J. (red.). Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Zabrze, 89–96.
- HO M. S., NIELSEN C. P., 2007. *Clearing the Air: The Health and Economic Damages of Air Pollution in China*. MIT Press
- ISOBE S., KOSAI H., 1998. *Star watching observations to measure night sky brightness*. [W:] *Preserving the Astronomical Windows*. ISOBE S., HIRAYAMA T. (red.). Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 175–184.
- KERBER F., QUEREL R. R., RONDANELLI R., HANUSCHIK R., VAN DEN ANCKER M., CUEVAS O., SMETTE A., SMOKER J., ROSE T., CZEKALA H., 2014. *An episode of extremely low precipitable water vapour over Paranal observatory*. Monthly Not. Royal Astronom. Soc. 439, 247–255.
- KERMANI M., NADDAFI K., SHARIAT M., MESBAH A. S., 2003. *Chemical composition of TSP and PM10 and their relations with meteorological parameters in the ambient air of Shariati Hospital District*. Iranian J. Public Health 32, 68–72.
- KOLLÁTH Z., 2008. *The effects of artificial lights at the Zselic Landscape Protection Area*. Przegląd Elektrotechniczny 84, 76–79.
- KOLLÁTH Z., 2010. *Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park*. [W:] *5th Workshop of Young Researchers in Astronomy & Astrophysics*. FORGÁCS-DAJKA E., PLACHY E., MOLNÁR L. (red.). J. Physics Conference Series, 218, 012001–012008.
- KOSAI H., ISOBE S., 1991. *Organised Observations of Night-sky Brightness in Japan during 1987–1989*. [W:] *Fifth Asian-Pacific Regional Astronomy Meeting*. ASHLEY M. C. B., CASWELL J. L., COUCH W. J., HUNSTEAD R. W., PROUST K. M. (red.). Astronom. Soc. Australia, Proc. 9, 180–183.
- KUBALA M., ŚCIEŻOR T., DWORAK T. Z., KASZOWSKI W., 2009. *Artificial Sky Glow in Cracow Agglomeration*. Polish J. Environ. Studies 18, 194–199.
- KYBA C. C. M., RUHTZ T., FISCHER J., HÖLKER F., 2011. *Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems*. PLoS ONE, 6, e17307.
- KYBA C. C. M., RUHTZ T., FISCHER J., HÖLKER F., 2012. *Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover*. Monthly Not. Royal Astronom. Soc. 425, 701–708.
- PUN C. S. J., SO C. W., 2012. *Night-sky brightness monitoring in Hong Kong: a city-wide light pollution assessment*. Environ. Monit. Assess. 184, 2537–2557.
- SCHREUDER D. A., 2001. *Sky Glow Measurements in the Netherlands*. [W:] *Preserving the Astronomical Sky*. KOHEN R. J., SULLIVAN III W. T. (red.). Int. Astronom. Union Symposium 196, Astronom. Soc. Pacific, 130–133.
- ŚCIEŻOR T., 2013. *A new astronomical method for determining the brightness of the night sky and its application to study long-term changes in the level of light pollution*. Monthly Not. Royal Astronom. Soc. 435, 303–310.
- ŚCIEŻOR T., KUBALA M., 2014. *Particulate matter as an amplifier for astronomical light pollution*. Monthly Not. Royal Astronom. Soc. 444, 2487–2493.
- ŚCIEŻOR T., KUBALA M., KASZOWSKI W., DWORAK T. Z., 2010. *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- ŚCIEŻOR T., KUBALA M., KASZOWSKI W., 2012. *Light Pollution of the Mountain Areas in Poland*. Arch. Environ. Protect. 38, 59–69.
- THRALL A. D., HUDISZEVSKEYJ A. B., 1984. *An update on the use of particulate ratios to access likely PM10 attainment status*. EPA-450/4-84-013.
- TREANOR P. J., SALPETER E., 1972. *A Portable Night-Sky Photometer*. Observatory 92, 96–99.
- WALKER M. F., 1970. *Light Pollution in California and Arizona*. Publ. Astronom. Soc. Pacific 82, 672–698.
- WALKER M. F., 1977. *The effects of urban lighting on the brightness of the night sky*. Publ. Astronom. Soc. Pacific 89, 405–409.

TOMASZ ŚCIEŻOR, MAREK KUBAŁA

Wydział Inżynierii Środowiska

Politechnika Krakowska

Warszawska 24, 31-155 Kraków

WPŁYW ZAPYLENIA ATMOSFERY NA JASNOŚĆ NOCNEGO NIEBA

Streszczenie

Za jasność nocnego nieba odpowiada wiele czynników, zarówno naturalnych, jak pochodzenia sztucznego. W przypadku nieba zachmurzonego głównym źródłem oświetlenia powierzchni Ziemi są chmury odbijające wadliwie ukierunkowane sztuczne światła naziemne. Autorzy pracy postawili tezę, że za sezonowe zmiany jasności nocnego, bezchmurnego nieba w warunkach zanieczyszczenia świetlnego odpowiada przede wszystkim pył zawieszony, pochodzący głównie ze źródeł niskiej emisji, zwłaszcza w okresie zimowym. Efekt ten jest szczególnie widoczny w Krakowie i okolicach, będących jednym z najbardziej zapylnych miejsc w Europie. Przeprowadzone na terenie aglomeracji krakowskiej ponad roczne pomiary pozwoliły ustalić liniową zależność między wartością wskaźnika koncentracji pyłów zawieszonych w atmosferze PM₁₀ a jasnością nocnego, bezchmurnego nieba. Podobną zależność stwierdzono dla punktu pomiarowego znajdującego się przy Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Pedagogicznego im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, położonym na górze Suhora w Gorczańskim Parku Narodowym. Wstępnie stwierdzono występowanie podobnych zależności dla innych uprzemysłowionych obszarów w Polsce.

TOMASZ ŚCIEŻOR, MAREK KUBAŁA

FACULTY OF THE ENVIRONMENTAL ENGINEERING

CRACOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

WARSZAWSKA 24, 31-155 KRAKÓW

IMPACT OF THE PARTICULATE MATTER ON THE NIGHT SKY BRIGHTNESS

Summary

The brightness of the night sky depends on many factors of both natural and artificial origin. In the case of overcast sky the clouds are the main source of lighting the earth's surface, bouncing incorrectly targeted artificial lights. In the case of a cloudless sky there are noticeable differences in its brightness, not only in the year, but also in a short timescale. The authors put the thesis that the main factor affecting the brightness of the cloudless, light polluted night sky is the particulate matter (PM), deriving mainly from low-emission, especially in winter. This effect is particularly evident in Krakow and its surroundings, one of the most PM polluted places in Europe. Over the year measurements made in the Krakow agglomeration allowed to establish a linear relationship between the concentration of PM and brightness of the night, cloudless sky. A similar effect was found for the measurement point near the Mount Suhora astronomical observatory in the Gorce Mountains National Park. The preliminary observations indicate that similar correlations occur for the other industrialized areas in Poland.