

**TURBULENCJA OPTYCZNA W CENTRUM MIASTA  
W ŚWIETLE POMIARÓW SCYNTYLOMETRYCZNYCH  
NA PRZYKŁADZIE ŁÓDZI**

**Optical turbulence measured with scintillometer  
over the city centre in the example of Łódź**

**MARIUSZ ZIELIŃSKI\*, KRZYSZTOF FORTUNIAK\*\*,  
WŁODZIMIERZ PAWLAK\*\*, MARIUSZ SIEDLECKI\*\***

**Zarys treści.** W pracy dokonano analizy czasowej zmienności parametru struktury współczynnika refrakcji, będącego miarą intensywności turbulencji. W opracowaniu zostały omówione ponadto podstawowe założenia pomiarów owego parametru za pomocą scyntylometru. Zastosowanie pomiarów scyntylometrycznych, z których można uzyskać średnie obszarowe wartości owego parametru, pozwoliło na poznanie zmienności intensywności turbulencji optycznej w ciągu roku oraz w biegu dobowym nad obszarem centrum Łodzi. Największą częstość występowania silnej turbulencji optycznej zaobserwowano wiosną i latem w ciągu dnia (blisko 40% przypadków), z czego najczęściej występowała ona w maju i w czerwcu. W całym okresie pomiarowym (sierpień 2009 – listopad 2012) zaobserwowano stosunkowo nieduży udział przypadków ze słabą turbulencją. Przyczyną tego jest najprawdopodobniej zjawisko miejskiej wyspy ciepła, które przyczynia się do intensyfikacji ruchów konwekcyjnych, jak również duża szorstkość powierzchni, która sprzyja mechanicznemu generowaniu turbulencji.

**Słowa kluczowe:** turbulencja optyczna, scyntylometr, parametr struktury współczynnika refrakcji, klimat miasta

**Abstract.** This study considers the temporal variability of the refractive index of air structure parameter  $C_n^2$ , which could be considered as the measure of optical turbulence intensity. In addition, the principals of scintillation method were presented. On the basis of scintillometer data, i.e. the averaged path  $C_n^2$ , the annual and diurnal course of the optical turbulence in the city centre was analysed. The highest frequency of strong optical turbulence (ca. 40%) was observed in spring and summer, with maximum around May and June. In the whole study period, weak turbulence occurred rarely. This might result from the urban heat island, which intensifies the heat exchange between the urban surface and the overlying air. This effect contributes to the enhanced  $C_n^2$ . Additionally, the increased roughness of urban areas can lead to more frequent generation of mechanical turbulence.

**Key words:** optical turbulence, scintillometer, refractive index structure parameter, urban climate

## Wstęp

Turbulencja zachodząca w atmosferze ma bardzo duże znaczenie nie tylko w kształtowaniu warunków pogodowych czy też dyspersji zanieczyszczeń, lecz także dla transmisji fal elektromagnetycznych. Wiry turbulencyjne, transportując m.in. ciepło i parę wodną, powodują fluktuację współczynnika załamania światła, czyli tzw. scyntylację. Zjawisko to ma duże znaczenie dla transmisji danych przy wykorzystaniu bezprzewodowej komunikacji optycznej, np. pomiędzy satelitami a stacjami naziemnymi (np. Wilson

i in. 1997), czy coraz częściej telekomunikacji naziemnej (internet, telefonia komórkowa). Bardzo intensywna turbulencja optyczna i związana z nią scyntylacja, szczególnie w pogodne letnie dni, może również przyczyniać się do zmniejszenia jakości uzyskiwanych obrazów w podczerwieni, powodując ich rozmycie, odbłaski czy zniekształcenie (Tunick i in. 2005). Obrazy te, uzyskiwane zarówno z powietrza (np. Lagouarde i in. 2004; Waławender i in. 2014), jak i z powierzchni Ziemi (np. Hoyano i in. 1999; Chudnovsky i in. 2004), coraz częściej są stosowane również w badaniach klimatu miasta.

---

\* Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Instytut Geografii, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków; e-mail: mrzielinski@up.krakow.pl

\*\* Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

Intensywność turbulencji optycznej i związanej z nią scyntytacji można badać za pomocą parametru struktury współczynnika refrakcji  $C_n^2$ , który można traktować jako miarę intensywności turbulencji optycznej (Tunick i in. 2005). Rozwój metody scyntytacji (np. Wang i in. 1978; Hill i in. 1980; Meijninger 2003) umożliwił pomiar tego parametru w warstwie granicznej atmosfery. Najczęściej pomiary  $C_n^2$  ograniczone były do raczej jednorodnych powierzchni (np. Nieveen i in. 1998; Frederickson i in. 2000), rzadziej do bardziej urozmaiconych obszarów (np. Tunick 2008). Jak do tej pory większość badań prowadzonych za pomocą scyntytlometru w obszarach miejskich pomijała intensywność turbulencji, skupiając się na parametrze struktury temperatury (Wood i in. 2013) czy też turbulencyjnych strumieniach ciepła jawnego i utajonego (np. Lagouarde i in. 2006; Zieliński i in. 2013; Ward i in. 2014).

Głównym celem pracy jest analiza czasowej zmienności parametru struktury współczynnika refrakcji  $C_n^2$ , zmierzonego za pomocą scyntytlometru w centralnej części Łodzi.

## Pomiar parametru struktury współczynnika refrakcji przy pomocy scyntytlometru

Metoda scyntytacji opiera się na pomiarach fluktuacji natężenia promieniowania elektromagnetycznego wysyłanego przez nadajnik i rejestrowanego przez odbiornik. Promieniowanie elektromagnetyczne przemierzając atmosferę podlega szeregowi procesów, które prowadzą do zmiany jego parametrów. Współczynnik załamania światła ( $n$ ) zależy od temperatury, wilgotności i, w mniejszym stopniu, od ciśnienia atmosferycznego. Wiry turbulencyjne obecne w atmosferze cechują się różnymi wartościami tychże parametrów. W związku z tym powodują fluktuację współczynnika załamania światła na drodze pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, a w konsekwencji scyntytacji, czyli fluktuację natężenia promieniowania mierzonego przez odbiornik. Scyntytacji można obserwować w warunkach naturalnych, np. w gorący słoneczny dzień nad silnie rozgrzanym asfaltem, bądź też nocą, w postaci migotania gwiazd. Turbulencję występującą w atmosferze można opisać za pomocą parametrów struktury przestrzennej funkcji struktury drugiego rzędu. Fluktuacje dowolnej wielkości  $A$  są przypadkową funkcją czasu oraz położenia ( $x$ ). Przestrzenną funkcję struktury ( $D_A$ ) definiuje się jako średni kwadrat różnic

fluktuacji danej wielkości w punktach odległych o  $r$  (Tatarski 1961; Meijninger 2003):

$$D_A(r) = \langle [A(x+r) - A(x)]^2 \rangle, \quad (1)$$

gdzie  $\langle \rangle$  to średnia po zespole statystycznych realizacji procesu.

Parametr struktury drugiego rzędu dla dowolnej wielkości ( $C_A^2$ ) dla inercyjnej części spektrum turbulencji, czyli tej, w której energia przekazywana jest w wyniku procesu kaskadowego od większych do mniejszych wirów, można więc zdefiniować następująco (Kolmogorov 1942; Tatarski 1961):

$$C_A^2 = D_A(r) \cdot r^{-2/3} \quad (2)$$

W przypadku scyntytlometrii wykorzystuje się parametr struktury współczynnika refrakcji  $C_n^2$  [ $\text{m}^{-2/3}$ ], temperatury  $C_T^2$  [ $\text{K} \cdot \text{m}^{-2/3}$ ], wilgotności  $C_q^2$  [ $\text{g}^2 \cdot \text{m}^6 \cdot \text{m}^{-2/3}$ ] oraz kowariancji pomiędzy nimi  $C_{Tq}$ . Wariancja logarytmu naturalnego mierzonego przez scyntytlometr natężenia promieniowania ( $\sigma_{\ln I}^2$ ) jest związana z parametrem struktury współczynnika załamania światła. Dla scyntytlometrów o dużej aperturze (ang. *Large Aperture Scintillometer* – LAS) relacja ta przyjmuje postać (Wang i in. 1978):

$$C_n^2 = 1,12 \cdot \sigma_{\ln I}^2 \cdot D^{7/3} \cdot R^{-3} \quad (3)$$

gdzie:

- D – apertura przyrządu,
- R – długość ścieżki optycznej.

Powyższy związek jest prawdziwy tylko w pewnym zakresie. Jeżeli turbulencja jest zbyt silna, to może dojść do zjawiska saturacji (nasylenia sygnału), polegającego na tym, że niezależnie od wzrostu intensywności turbulencji fluktuacje mierzonego promieniowania ustalają się na pewnym stałym poziomie. Saturacja może również wystąpić w przypadku, gdy ścieżka optyczna jest za długa w stosunku do danej apertury, bądź też wysokość pomiarów jest zbyt mała w stosunku do danej długości ścieżki (np. Clifford i in. 1974). Ochs i Wilson (1993) wykazali, że w przypadku scyntytlometrów z grupy LAS działających, w zakresie danej długości fali elektromagnetycznej, saturacja nie występuje tak długo póki spełniona jest następująca zależność:

$$C_n^2 < 0,193 \cdot R^{-8/3} \cdot D^{5/3} \cdot \lambda^{2/6}, \quad (4)$$

gdzie:

- $\lambda$  – długość fali elektromagnetycznej.

Bardziej restrykcyjne kryterium zaproponowali Frehlich i Ochs (1990):

$$C_n^2 < 0,057 \cdot R^{-8/3} \cdot D^{5/3} \cdot \lambda^{1/3} \quad (5)$$

Parametr  $C_n^2$  może stanowić miarę intensywności turbulencji (np. Tunick i in. 2005). W warstwie granicznej atmosfery typowe wartości parametru struktury współczynnika załamania światła osiągają wartości z zakresu  $10^{-12}$  do  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  (Kallistratova, Timanovskiy 1971). Wartości przekraczające  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  świadczą o bardzo silnej turbulencji, która może spowodować wystąpienie scyntylacji widocznej „gołym okiem”. Najwyższe wartości  $C_n^2$  obserwuje się w południe, z kolei niższe wartości, rzędu  $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ , czy  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ , występują w warunkach równowagi zbliżonej do neutralnej (Tunick i in. 2005), jak również w przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych (np. opadów). Warto nadmienić, iż w warstwie granicznej wartość  $C_n^2$  w ciągu dnia zazwyczaj szybko maleje wraz ze wzrostem wysokości (Beland 1993). Zjawisko to można zaobserwować nad gorącą powierzchnią, bezpośrednio nad którą obraz „faluje”, a wraz ze wzrostem wysokości intensywność owego „falowania” maleje, aż zanika na pewnym poziomie.

Scyntylometr pozwala na uzyskanie pomiarów uśrednionych wzdłuż pewnej ścieżki pomiarowej, przy czym końcowy wynik nie jest zwykłą średnią arytmetyczną, a średnią ważoną za pomocą tzw. funkcji wagowej scyntylometru (PWF(x)). Przybliżona analityczna forma funkcji wagowej przedstawia się następująco (Scintec 2011):

$$PWF(x) = 2,163 \cdot JJ_1(2,283 \cdot \pi \cdot (x-0,5)) \quad (6)$$

gdzie:

$x$  – względna odległość danego punktu na ścieżce od odbiornika ( $0 \leq x \leq 1$ ),

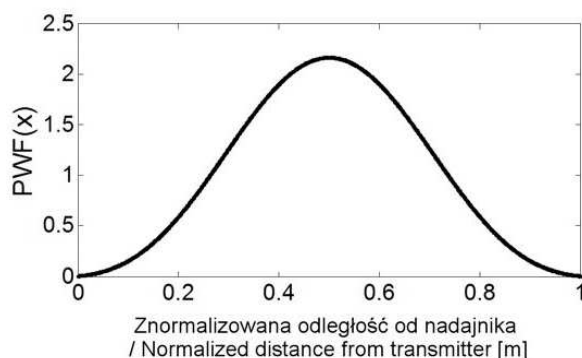
$JJ_1(y)$  –

$$JJ_1(y) = \begin{cases} 1 & y = 0 \\ \left( 2 \cdot \frac{J_1(y)}{y} \right)^2 & y \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$J_1(y)$  – funkcja Bessela pierwszego rodzaju  
 $y = 2,283 \cdot \pi \cdot (x - 0,5)$ .

Analiza funkcji wagowej scyntylometru LAS (rys. 1) pozwala zauważyć, że największy wpływ na mierzone wartości ma turbulencja zachodząca w środkowej części ścieżki pomiarowej. Jest to ogólna prawidłowość dla wszystkich typów scyntylometrów, jednakże kształt funkcji wagowej dla pozostałych rodzajów tego przyrządu jest inny. Scyntylacja zachodząca w pobliżu odbiornika i nadajnika nie ma praktycznie żadnego znaczenia. Stanowi to zaletę owej metody, gdyż elementy konstrukcyjne, na których zamontowane są elementy scyntylometru, nie wpływają na modyfikację mierzonych wartości.



Rys. 1. Funkcja wagowa scyntylometru w zależności od znormalizowanej odległości między nadajnikiem a odbiornikiem scyntylometru

Scintillometer path weighting function as a function of normalized distance from receiver to transmitter

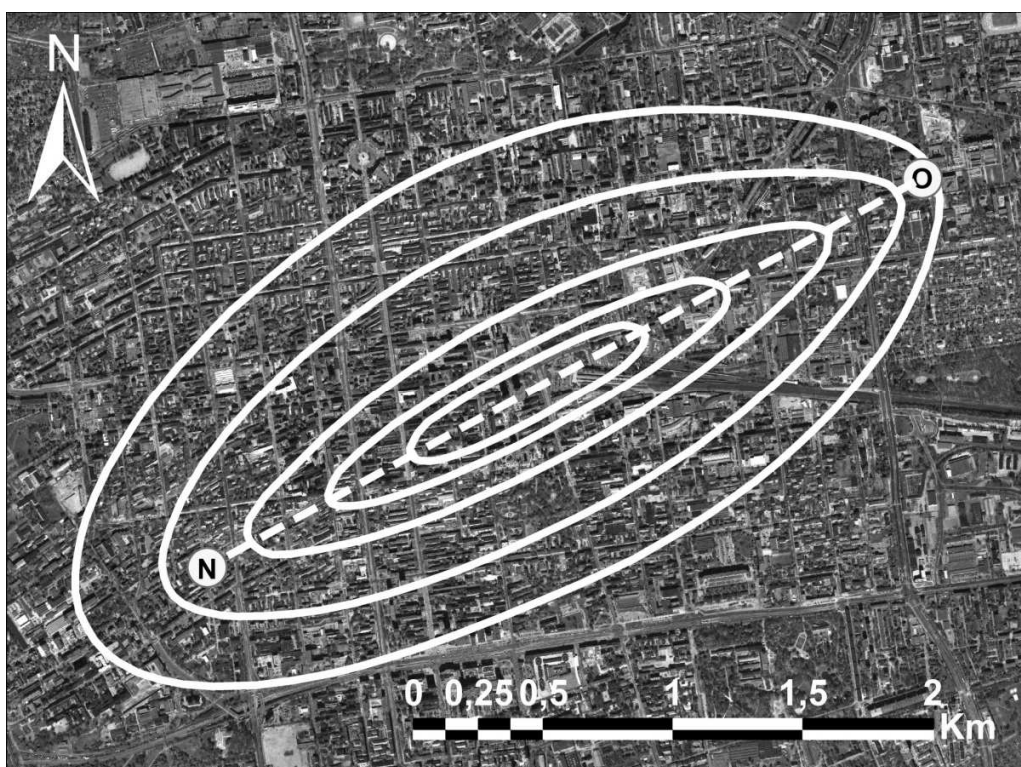
## Punkty pomiarowe i dane

Łódź jest obecnie trzecim miastem w Polsce pod względem liczby ludności (ok. 705 tys. mieszkańców). Powierzchnia miasta w granicach administracyjnych wynosi 293,25 km<sup>2</sup>, z czego blisko 145 km<sup>2</sup> stanowią tereny zabudowane (budynki, ulice, place parkingowe itp.). Powierzchnia terenu w Łodzi jest lekko nachylona w przybliżeniu z północnego wschodu (278 m n.p.m.) na południowy zachód (162 m n.p.m.), przy czym w zabudowanej części miasta deniwelacja jest stosunkowo niewielka (ok. 55 m). Centralna część miasta cechuje się bardzo regularną siatką ulic, jak również względnie jednorodną zabudową o wysokości rzadko przekraczającej 15–20 m. Większość budynków znajdujących się w tej części miasta powstała na przełomie XIX i XX wieku. Centrum miasta otaczają duże dzielnice mieszkaniowe, z dominującymi blokami mieszkalnymi, głównie 5-kondygnacyjnymi (ok. 15 m wysokości). W dzielnicach tych zbudowano również szereg wieżowców, których wysokość

dochodzi nawet do 35 m. Pomiędzy owe dzielnice mieszkaniowe wkomponowane są dzielnice przemysłowe, największą z nich jest Teofilów (na północnym zachodzie). W niektórych terenach przemysłowych nastąpiła sukcesja funkcji na rzecz usług i handlu. Najgęściej zabudowana część miasta otoczona jest licznymi kompleksami zieleni, a największy z nich (park Zdrowie) znajduje się w zachodniej części Łodzi. W centrum również zlokalizowano kilka parków, jednak nie zajmują one znacznej powierzchni. Na obrzeżach miasta dominuje zabudowa jednorodzinna rezydencjonalna.

Pomiary scyntylometryczne w Łodzi prowadzone były w okresie od sierpnia 2009 do listopada 2012 roku. W tym czasie uzyskano unikalnie długą jak na skalę polską czy światową serię pomiarową. Na maszcie przy ul. Lipowej 81 został zamontowany nadajnik scyntylometru na wysokości około 31 m nad powierzchnią gruntu. Równocześnie na dachu XIV Domu Studenta Uniwersytetu Łódzkiego, przy ul. Matejki 21/23,

zamontowano odbiornik scyntylometru (rys. 2). Wysokość XIV DS UŁ wynosi około 36 m. Średnia wysokość ścieżki pomiarowej wynosiła ok. 34,4 m. W obszarach o gęstej zabudowie, czy też zwartej szacie roślinnej, logarytmiczny profil wiatru obserwowany jest dopiero powyżej pewnej wysokości, jest to tzw. wysokość przesunięcia ( $z_d$ ), którą w miastach często szacuje się na podstawie średniego poziomu dachów ( $z_H$ ), jako  $z_d = 0,7z_H$ . Po uwzględnieniu  $z_d$  (średnio ok. 10 m) wysokość efektywna ścieżki optycznej wynosiła ok. 24,5 m. Do badań w Łodzi wykorzystany został scyntylometr BLS900 (Scintec AG, Rottenburg, Niemcy), należący do grupy scyntylometrów o dużej aperturze (ang. *Large Aperture Scintillometer* – LAS). Pozwala on na badania wzdłuż ścieżki pomiarowej o długości wynoszącej od 250 do 5000 m. Długość ścieżki w analizowanym przypadku wynosiła 3142 m, a jej zachodnia część przebiegała nad najbardziej zabudowanymi obszarami Łodzi (częściowo m.in. nad ul. Piotrkowską).



Rys. 2. Lokalizacja nadajnika (N) i odbiornika (O) scyntylometru

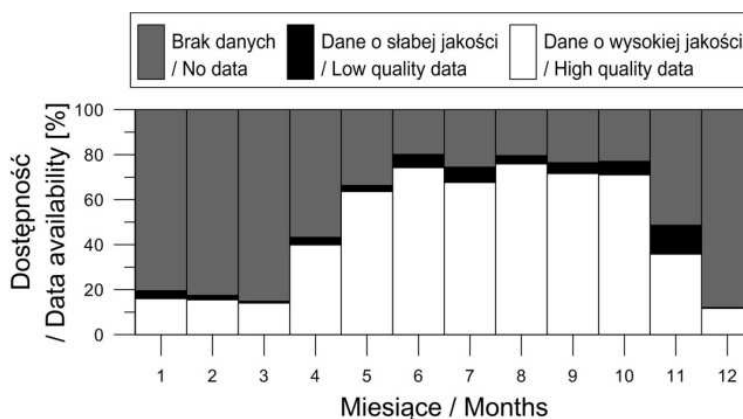
przerwaną linią zaznaczono ścieżkę optyczną scyntylometru; liniami ciągłymi zaznaczono średni obszar źródłowy scyntylometru na poziomie  $p = 25, 50, 75, 90$  i  $95\%$  w warunkach równowagi chwiejnej; zdjęcie lotnicze: maps.google.pl

Scintillometer transmitter (N) and receiver (O) localization

broken line indicates optical path; solid lines indicate scintillometer source area at  $p = 25, 50, 75, 90$  and  $95\%$  under unstable conditions; aerial photography: maps.google.pl

Oprócz wysokości pomiaru na mierzone wartości  $C_n^2$  wpływ ma również wielkość obszaru źródłowego (rys. 2). Zmienia się ona w zależności od stanu równowagi atmosfery, w dużej mierze zależy też od szorstkości podłoża i prędkości z jaką przepływa powietrze. W warunkach równowagi chwiejnej powierzchnia obszaru źródłowego scyntylometru nie przekraczała zazwyczaj  $2 \text{ km}^2$ , w warunkach zbliżonych do równowagi obojętnej obszar ten często obejmował powierzchnię ok.  $9\text{--}10 \text{ km}^2$ , zaś w warunkach równowagi stałej, przy niewielkich prędkościach wiatru, często sięgał nawet  $30 \text{ km}^2$ . W związku z tym rzeczywisty obszar, dla którego wykonywany jest pomiar za pomocą scyntylometru, może niekiedy bardzo się różnić.

Pomimo długiego okresu pomiarowego nie udało się uniknąć znacznych luk w serii pomiarowej, co związane było z szeregiem problemów technicznych, jakie pojawiały się w chłodnej połowie roku (pomiarów nie wykonywano w okresie styczeń–maj 2010 roku, jak również grudzień 2010 – marzec 2011 roku). Ponadto, gdy w latach 2011–2012 XIV DS podlegał remontowi, wielokrotnie dochodziło do wyłączania napięcia, co skutkowało przerwami w pomiarach. W związku z powyższymi trudnościami najmniej danych (< 20% możliwych do zgromadzenia) udało się zebrać dla okresu zimy (rys. 3), najwięcej zaś od maja do października (> 65% danych w każdym miesiącu).



Rys. 3. Dostępność danych scyntylometrycznych w całym okresie pomiarowym

do danych o słabej jakości zaliczono te, które nie przeszły kontroli jakości – nie wykorzystywane w dalszych analizach

Scintillometer data availability during the entire considered period

data that does not pass the quality control is flagged as low quality data and is not used in further analyses

Scyntylometr pracował z częstotliwością 125 Hz, a dane uśrednione w przedziałach 1-minutowych zapisywane były w dobowych plikach. W trakcie pomiarów automatycznie stosowana była poprawka na saturację, ekstynkcję oraz efekty zewnętrznej skali turbulencji (wprowadzane przez oprogramowanie scyntylometru). Zgromadzone dane zostały poddane kontroli jakości, w ramach której z dalszych analiz pomijano dane:

1. z błędami (np. rozkalibrowanie przyrządu, zbyt słaby sygnał),
2. uzyskane w okresie występowania opadu,
3. przekraczające kryterium wystąpienia saturacji (równanie 5),
4. z bardzo wysokimi wartościami  $C_n^2$ , związane zapewne z błędami sprzętowymi, niezasy-

gnalizowanymi przez oprogramowanie przyrządu.

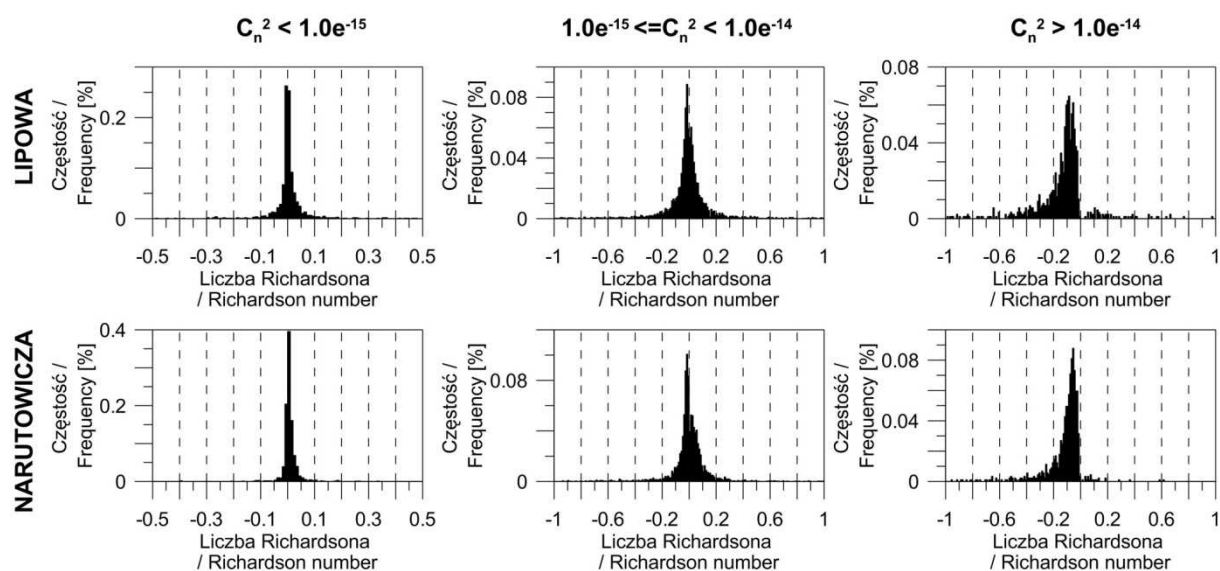
Okolo 5% danych nie przeszło pozytywnie kontroli jakości. Najwięcej odrzucono ich w listopadzie (blisko 12%), ze względu na znaczne zmniejszenie widzialności związane z częstymi w tym miesiącu zamgleniami i mgłami. W całym analizowanym okresie zaledwie 0,04% danych przekroczyło kryterium wystąpienia saturacji, co wskazuje na bardzo poprawne zlokalizowanie przyrządu – ścieżka miała odpowiednią długość w stosunku do wysokości, na jakiej dokonywany był pomiar.

Jak podaje Tunick i in. (2005) w warunkach stratyfikacji stałej bądź zbliżonej neutralnej wartości  $C_n^2$  z reguły nie przekraczają  $10^{-16}\text{--}10^{-15}$ . W ciągu dnia typowe wartości  $C_n^2$  kształtują się na poziomie zbliżonym do  $10^{-14}$ , zaś wartości

przekraczające  $10^{-13}$  świadczą o bardzo silnej turbulencji i możliwym występowaniu scyntylacji widocznej „gołym okiem”. W związku z powyższym na potrzeby niniejszej pracy za słabą turbulencję optyczną przyjęto taką, która wiązała się z wartościami  $C_n^2 < 10^{-15}$ . Za turbulencję umiarkowaną przyjęto wartości  $C_n^2$  z przedziału  $10^{-15}$ – $10^{-14}$ , zaś silną turbulencję – wartości przekraczające  $10^{-14}$ .

Za powyższą klasyfikacją może też przemawiać porównanie strumieniowej liczby Richardsona ( $R_i$ ) wyznaczonej z pomiarów kowariancyjnych na dwóch posterunkach w Łodzi, przy ul. Lipowej i Narutowicza (Fortuniak 2010), z wartościami parametru struktury współczynnika refrakcji uzyskanego z pomiarów scyn-

tylometrycznych (rys. 4). W przypadku wartości  $C_n^2 < 10^{-15}$  zaobserwowano nieznacznie więcej przypadków z dodatnią  $R_i$ , świadczącą o słabej bądź umiarkowanej turbulencji. Ujemne wartości  $R_i$ , wskazujące na silną turbulencję, wyraźnie dominowały w przypadku wartości  $C_n^2 > 10^{-14}$ . Podczas występowania  $C_n^2$  z przedziału  $10^{-15}$ – $10^{-14}$   $R_i$  osiągało niskie wartości zbliżone do 0. Należy przy tym pamiętać, iż pomiary kowariancyjne, ze względu na znacznie mniejszy obszar źródłowy, nie będą w pełni reprezentatywne dla obszaru źródłowego scyntylometru. Podobne wyniki uzyskano przy porównaniu  $C_n^2$  z parametrem stabilności wyznaczonym w obu punktach pomiarowych (rezultatów badań nie zaprezentowano w niniejszym artykule).



Rys. 4. Liczba Richardsona wyznaczona z pomiarów kowariancyjnych na masztach przy ul. Lipowej i Narutowicza uśredniona w przedziałach 1-godzinnych podczas występowania określonych wartości parametru struktury współczynnika refrakcji ( $C_n^2$ )

Richardson's number derived from eddy covariance measurements at the Lipowa and Narutowicza sites averaged in 1-hour blocks under different optical turbulence regimes defined with the refractive index structure parameter ( $C_n^2$ )

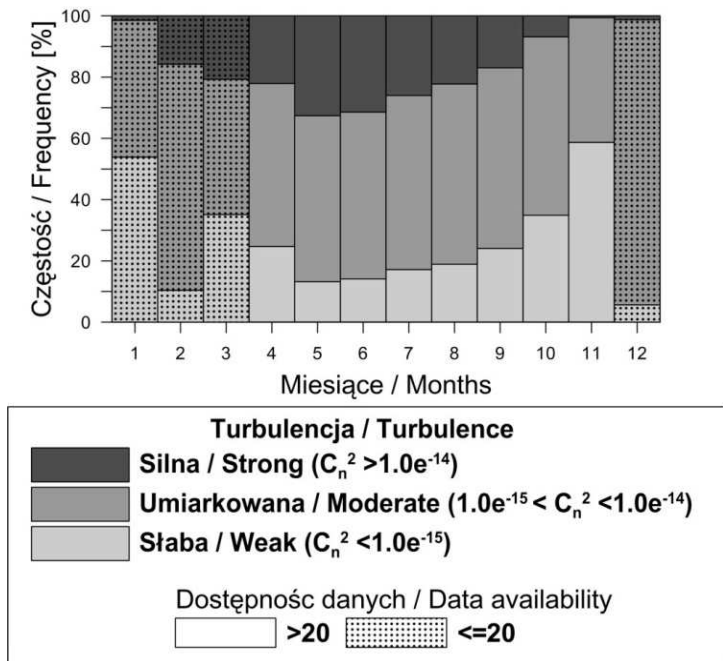
## Czasowa zmienność intensywności turbulencji nad miastem

Intensywność turbulencji optycznej nad centrum miasta cechuje się wyraźnym biegiem rocznym (rys. 5, 6), jak również biegiem dobowym (rys. 7). Silna turbulencja ( $C_n^2 > 1,0 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ) występowała najczęściej w maju i w czerwcu, kiedy to obserwowano ją przez blisko 30% czasu. Najrzadziej obserwowano ją późną jesienią i zimą. Ze względu na brak wystarczającej ilości danych z okresu zimowego uzyskanych wyników

nie można traktować jako reprezentatywnych. Dla przykładu wysoki udział silnej turbulencji w lutym wynikał z faktu, iż w tym miesiącu pomiary scyntylometryczne udało się przeprowadzić tylko w okresie bardzo silnej adwekcji chłodu. W takich warunkach powierzchnia miasta oddaje znaczne ilości ciepła atmosferze, co z kolei powoduje intensyfikację scyntylacji, a co za tym idzie – zwiększenie wartości  $C_n^2$ . Nad obszarem miasta w okresie zimy turbulencja teoretycznie powinna być intensyfikowana chociażby przez dodatkowy strumień ciepła pochodzący ze spalania paliw kopalnych. Jednak z wyjątkiem lutego

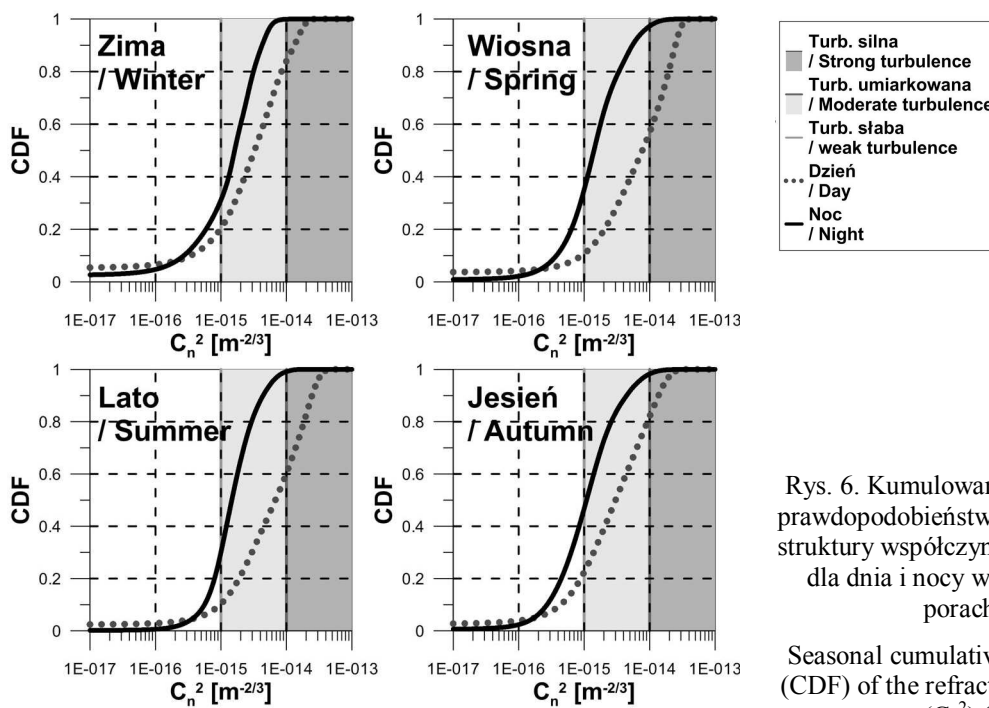
nie zaobserwowano dużej częstości pojawiania się silnej turbulencji optycznej zimą. Z tego powodu wysoki (blisko 17%) udział silnej turbulencji w lutym wynikał raczej ze specyficznych warunków pomiarowych niż ogólnej prawidłowości.

Należy jeszcze raz podkreślić, iż w przypadku łódzkiej serii pomiarowej w okresie zimowym nie zebrano wystarczającej liczby reprezentatywnych danych.



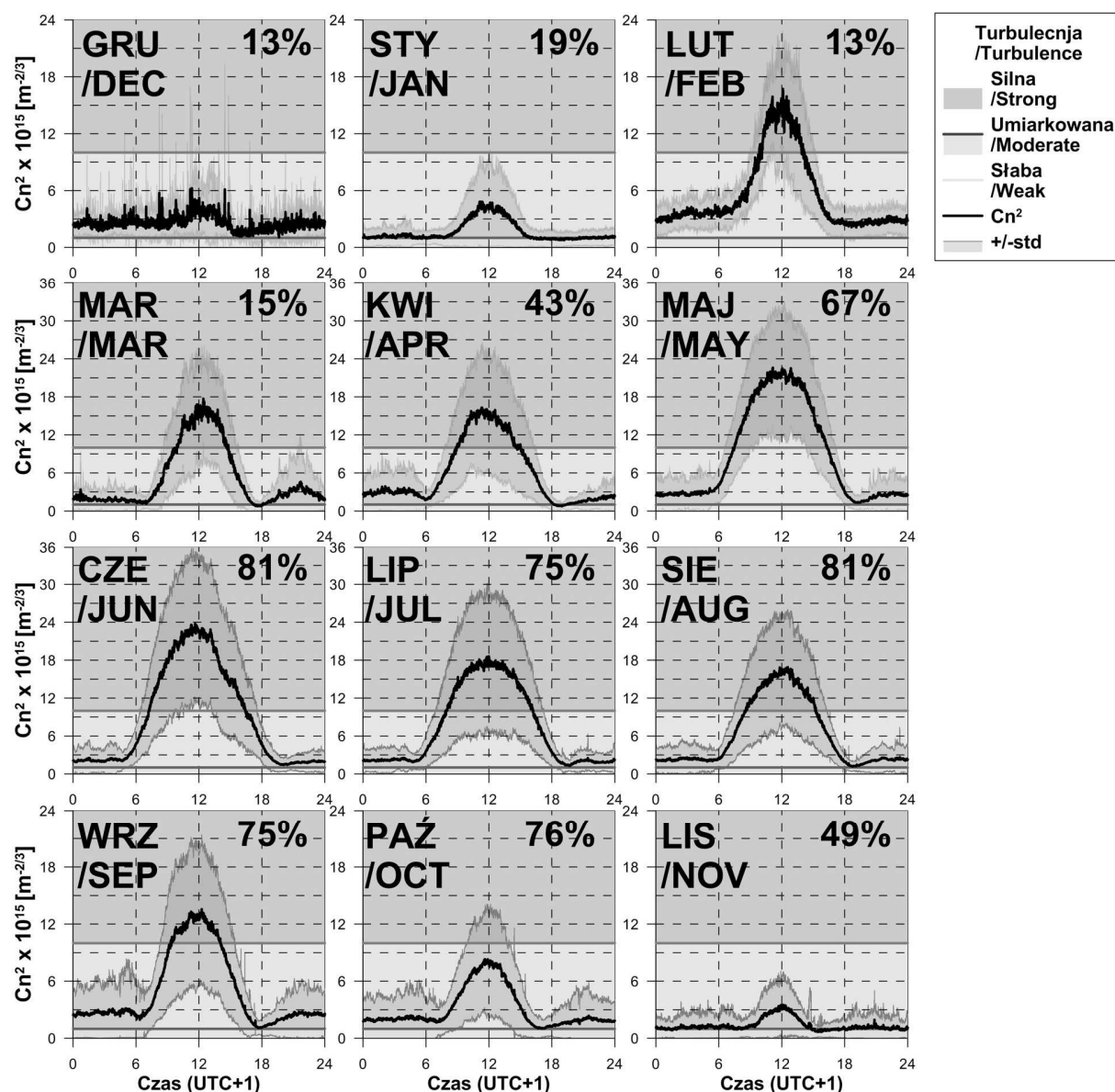
Rys. 5. Czasowa zmienność intensywności turbulencji optycznej w ciągu roku wyrażona częstością pojawiania się silnej, umiarkowanej i słabej turbulencji

Annual frequency of strong, moderate and weak optical turbulence



Rys. 6. Kumulowane funkcje gęstości prawdopodobieństwa (CDF) parametru struktury współczynnika refrakcji ( $C_n^2$ ) dla dnia i nocy w poszczególnych porach roku

Seasonal cumulative density function (CDF) of the refractive index structure parameter ( $C_n^2$ ) for day and night



Rys. 7. Średnie przebiegi dobowe parametru struktury współczynnika załamania światła ( $C_n^2$ ) w poszczególnych miesiącach roku, wyznaczone na podstawie wszystkich dostępnych danych, które pozytywnie przeszły kontrolę jakości

dotąd dodatkowo zaznaczono zakres wyznaczony przez  $\pm 1$  odchylenie standardowe; w prawym górnym narożniku podano dostępność danych scyntylogometrycznych dla poszczególnych miesięcy

Monthly average diurnal course of the refractive index structure parameter ( $C_n^2$ ) – prepared on the basis of data that passed quality control

$\pm 1$  standard deviation range was indicated with transparent fill; the data availability for each month is shown in upper-right corner of the plot

W omawianym okresie słaba turbulencja optyczna ( $C_n^2 < 1,0e^{-15} m^{-2/3}$ ) najczęściej występowała w listopadzie (blisko 60%). Stosunkowo często odnotowywano ją w styczniu (ponad 50% przypadków) oraz na przełomie zimy i wiosny, jak również jesienią. W okresie od maja do sierpnia przypadków ze słabą scyntyacją, wynikającą

z niewielkiej turbulencji, nie obserwowano przez więcej niż 20% czasu.

Porównując kumulowane funkcje gęstości prawdopodobieństwa  $C_n^2$  w poszczególnych porach roku, wyznaczone osobno dla dnia i nocy (rys. 6), można zauważyć pewne podobieństwa pomiędzy wiosną a latem oraz między okresem jesieni i zimy. W pierwszym przypadku silną



turbulencję optyczną w ciągu dnia obserwowano przez blisko 40% czasu, a słaba turbulencja występowała nie częściej niż przez 10% czasu. W wiosenne i letnie noce dominowała zdecydowanie turbulencja umiarkowana, która stanowiła blisko 70% czasu. Pojawiały się jednakże epizody z mocniejszą turbulencją (ok. 2–3%), które mogły być związane z silnie rozwiniętą miejską wyspą ciepła występującą w Łodzi najczęściej w okresie letnim (Fortuniak 2003). W okresie zimy oraz jesieni silną turbulencję w ciągu dnia zaobserwowano w blisko 20% przypadków. W związku z mniejszym czasem operacji słonecznej, a co za tym idzie mniejszą energią promieniowania, w ciągu dnia często występowały okresy słabej turbulencji optycznej (ok. 20%). Zimą, w ciągu nocy, silna turbulencja praktycznie nie występowała, natomiast jesienią pojawiała się z podobną częstością jak w pozostałych porach roku. Warto zauważyć, iż w nocy, zarówno zimą, jak i jesienią, również dominowała umiarkowana turbulencja, co prawdopodobnie wynika z rozwoju miejskiej wyspy ciepła w Łodzi.

W analizowanym okresie wyraźny bieg dobowy  $C_n^2$  zaznaczył się praktycznie we wszystkich miesiącach z wyjątkiem grudnia (rys. 7). Było to spowodowane faktem, iż w owym miesiącu problemy techniczne nie pozwoliły na zebranie danych w dłuższym okresie czasu, w których cykl dobowy byłby zauważalny. Lokalne minimum turbulencji optycznej, jakie obserwuje się w okolicach wschodu i zachodu Słońca (Wesely, Alcaraz 1973; Tunick i in. 2005), w przypadku średnich przebiegów  $C_n^2$  zaznacza się tylko w niektórych miesiącach. Wynika to ze specyficznego bilansu energetycznego powierzchni czynnej w miastach. W obszarach zurbanizowanych, cechujących się znacznym udziałem powierzchni sztucznych o dużej pojemności cieplnej, w ciągu dnia gromadzone są znaczne ilości ciepła. Uwalnianie go, wraz z emisją dużej ilości ciepła pochodzącego ze spalania paliw kopalnych, przyczynia się do podtrzymywania dodatniego (skierowanego do atmosfery) turbulencyjnego strumienia ciepła jawnego zarówno po zachodzie Słońca, jak i nocą (np. Fortuniak 2010; Kotthaus, Grimmond 2014). W takich warunkach konwekcja zachodząca nad miastem przyczynia się do intensyfikacji turbulencji optycznej.

W biegu rocznym najwyższe wartości  $C_n^2$  obserwowano w czerwcu, kiedy w południe średnio przekraczały  $2,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  (rys. 7). Najwyższe obserwowane wartości tego parametru były w tym miesiącu znacznie wyższe, gdyż dochodziły do  $5,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ . Warto przy tym za-

uważyć, iż spośród danych, które pomyślnie przeszły kontrolę jakości nie zaobserwowano przypadków przekraczających  $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ , co mogłoby wskazywać na występowanie widocznej scyntytacji. W czerwcu, podobnie jak w maju, silna turbulencja dominowała od ok. 7.00 do 17.00, zaś w nocy rzadko obserwowano przypadki słabej turbulencji. W lipcu, w południe, wartości  $C_n^2$  były niższe niż w czerwcu i zbliżone do tych, jakie obserwowano w sierpniu. Skróceniu uległ jednakże czas, w jakim pojawiała się silna turbulencja do ok. ośmiu godzin. W listopadzie, grudniu i styczniu w południe praktycznie nie zaobserwowano silnej turbulencji. W ciągu dnia dominowała turbulencja umiarkowana, w nocy zaś turbulencja słaba. Stosunkowo duże wartości  $C_n^2$  pojawiające się w porze nocnej związane są z rozwojem miejskiej wyspy ciepła, gdy zintensyfikowane oddawanie ciepła przez miasto powoduje intensyfikację turbulencji optycznej. Dowodem tego jest średni przebieg  $C_n^2$  dla lutego, ponieważ dane uzyskano tylko podczas silnej adwekcji chłodu, która miała miejsce w lutym 2012 roku. Wówczas, przy dużych kontrastach pomiędzy chłodną masą powietrza zalegającą nad Łodzią a powierzchnią miasta, dochodziło do intensywnej wymiany ciepła, a co za tym idzie – do intensyfikacji turbulencji.

## Podsumowanie

W pracy zaprezentowano wyniki blisko 3-letnich pomiarów parametru struktury współczynnika refrakcji  $C_n^2$ , który można traktować jako miarę intensywności turbulencji optycznej. Turbulencja ta ma duże znaczenie, szczególnie w przypadku stosowania metod pomiarowych wykorzystujących obrazowanie w zakresie podczerwieni.

W centralnej części Łodzi silna turbulencja optyczna pojawiała się praktycznie tylko w ciągu dnia w cieplej połowie roku, zaś w pozostałych przypadkach jedynie sporadycznie. W nocy dominowała turbulencja umiarkowana i słaba, zaś w południe, w okresie od lutego do września, silna turbulencja optyczna.

W przebiegu wartości  $C_n^2$ , podobnie jak w przypadku innych parametrów meteorologicznych, można było zauważyć cechy wynikające ze specyfiki obszarów zurbanizowanych. Występowanie umiarkowanej turbulencji w nocy wiązało się z występowaniem zjawiska miejskiej wyspy ciepła: ciepło nagromadzone w obszarze

miejskim w ciągu dnia i uwalniane w większej ilości po zachodzie Słońca, wraz z ciepłem pochodzenia antropogenicznego, w nocy doprowadzało do intensyfikacji turbulencji.

Praca została zrealizowana w ramach grantu badawczego nr rej. 2011/01/N/ST10 /07529 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2011–2014. Część danych pozyskana została w ramach realizacji grantu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr rej. N N306 276935 w latach 2008–2011.

## Literatura

- Beland Robert P. 1993. Propagation through Atmospheric Optical Turbulence. W: Frederick G. Smith (red.) *Atmospheric Propagation of Radiation*, 159-232. Bellingham Washington USA: SPIE Optical Engineering Press.
- Chudnovsky Alexandra, Eyal Ben-Dor, Hadas Saaroni. 2004. „Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements”. *Energy and Buildings* 36 (11): 1063-1074.
- Clifford Steven F., Gerard R. Ochs, Robert S. Lawrence. 1974. „Saturation of optical scintillation by strong turbulence”. *Journal of the Optical Society of America* 64 (2): 148-154.
- Fortuniak Krzysztof. 2003. Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Fortuniak Krzysztof. 2010. Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Frederickson Paul A., Kenneth L. Davidson, Carl R. Zeisse, Charles S. Bendall. 2000. „Estimating the Refractive Index Structure Parameter ( $C_n^2$ ) over the Ocean Using Bulk Methods”. *Journal of Applied Meteorology* 39: 1770-1783.
- Frehlich Rod G., Gerard R. Ochs. 1990. „Effects of saturation on the optical scintillometer”. *Applied Optics* 29 (4): 548-553.
- Hill Reginald J., Steven F. Clifford, Robert S. Lawrence. 1980. „Refractive Index and Absorption-Fluctuations in the Infrared Caused by Temperature, Humidity and Pressure Fluctuations”. *Journal of the Optical Society of America* 70 (10): 1192-1205.
- Hoyano Akira, Asano Kohichi, Kanamaru Takehisa. 1999. „Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography”. *Atmospheric Environment* 33 (24-25): 3941-3951.
- Kallistratova Margarita A., Dmitriy F. Timanovskiy. 1971. „The distribution of the structure constant of refractive index fluctuations in atmospheric surface layer”. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR - Fizika Atmosfery i Okeana* 7: 46-48.
- Kolmogorov Andrey N. 1942. „Equations of turbulent motion in an incompressible fluid”. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR - Fizika* 6: 56-58.
- Kotthaus Simone, Christine Susan B. Grimmond. 2014. „Energy exchange in a dense urban environment – Part I: Temporal variability of long-term observations in central London”. *Urban Climate* 10 (2): 261-280.
- Lagouarde Jean-Pierre, Mark Irvine, Jean-Marc Bonnefond, Christine Susan B. Grimmond, Nathalie Long, Timothy R. Oke, Jennifer A. Salmond, Brian Offerle. 2006. „Monitoring the sensible heat flux over urban areas using large aperture scintillometry: Case study of Marseille city during the ESCOMPTE experiment”. *Boundary-Layer Meteorology* 118 (3): 449-476.
- Lagouarde Jean-Pierre, Patrick Moreau, Mark Irvine, Jean-Marc Bonnefond, James A. Voogt, Frédéric Sollic. 2004. „Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France)”. *Remote Sensing of Environment* 93 (4): 443-462.
- Meijninger Wouter M.L. 2003. Surface fluxes over natural landscapes using scintillometry. Wageningen: Wageningen University and Research Centrum.
- Nieveen Joost P., Alan E. Green, Wim Kohsiek. 1998. „Using Large-Aperture Scintillometer to Measure Absorption and Refractive Index Fluctuations”. *Boundary-Layer Meteorology* 87 (1): 101-116.
- Ochs Gerard R., John Wilson. 1993. A Second-Generation Large Aperture Scintillometer. NOAA Technical Memorandum ERL ETL-232. Boulder, CO, USA: NOAA Environmental Research Laboratories.
- Scintec. 2011. Scintec Boundary Layer Scintillometer Hardware Manual. Rottenburg: Scintec AG.
- Tatarski Valerian I. 1961. Wave propagation in a turbulent medium. New York: Dover Publications, Inc.
- Tunick Arnold. 2008. „Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path”. *Optics Express* 16 (19): 14645-14654.
- Tunick Arnold, Nikolay Tikhonov, Mikhail Vorontsov, Gary Carhart. 2005. Characterization of optical turbulence ( $C_n^2$ ) data measured at the ARL A LOT facility. Adelphi MA: Army Research Laboratory.
- Walawender Jakub P., Mariusz Szymanowski, Monika J. Hajto, Anita Bokwa. 2014. „Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from

- Landsat-7/ETM+ Data". *Pure and Applied Geophysics* 171 (6): 913-940.
- Wang Ting-i I., Gerard R. Ochs, Steven F. Clifford. 1978. „A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$ ”. *Journal of the Optical Society of America* 68 (3): 334-338.
- Ward Helen C., Jonathan G. Evans, Christine Susan B. Grimmond. 2014. „Multi-Scale Sensible Heat Fluxes in the Suburban Environment from Large Aperture Scintillometry and Eddy Covariance”. *Boundary-Layer Meteorology* 152 (1): 65-89.
- Wesely Marvin L., Ernest C. Alcaraz. 1973. „Diurnal Cycles of the Refractive Index Structure Function Coefficient”. *Journal of Geophysical Research* 78: 6224-6232.
- Wilson Keith E., James R. Lesh, Kenichi Araki, Yoshinori Arimoto. 1997. „Overview of the Ground-to-Orbit Lasercom Demonstration (GOLD)”. *Proc. SPIE 2990, Free-Space Laser Communication Technologies IX*, 23 (April 24, 1997); doi:10.1117/12.273703.
- Wood Curtis R., Rostislav D. Kouznetsov, Rosa Gierens, Annika Nordbo, Leena Järvi, Margarita A. Kallistratova, Jaakko Kukkonen. 2013. „On the Temperature Structure Parameter and Sensible Heat Flux over Helsinki from Sonic Anemometry and Scintillometry”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30: 1604-1615.
- Zieliński Mariusz, Krzysztof Fortuniak, Włodzimierz Pawlak, Mariusz Siedlecki. 2013. „Turbulent sensible heat flux in Łódź, Central Poland, obtained from scintillometer and eddy covariance measurements”. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (5): 603-613.

## Summary

This study considers the annual, seasonal and diurnal variability of optical turbulence intensity which was determined with the refractive index structure parameter ( $C_n^2$ ) measured with

a scintillometer. The data was collected in the period of August 2009 – November 2012 over the most densely built-up area of Łódź. The scintillometer measured path-averaged  $C_n^2$ , which allowed to determine the optical turbulence intensity. On the basis of the  $C_n^2$  values reported in literature for different atmospheric stability conditions, and comparison with the data collected from two masts located in Łódź, the optical turbulence intensity was divided into three classes: strong ( $C_n^2 > 10^{-14}$ ), moderate ( $10^{-14} > C_n^2 > 10^{-15}$ ) and weak turbulence ( $C_n^2 < 10^{-15}$ ).

Strong optical turbulence was observed almost only during daytime hours, mostly during the warm half of the year.  $C_n^2$  values exceeding  $10^{-14}$  were most frequent in May and June, and appeared almost 30% of the time. Seldom was the strong turbulence observed in autumn and winter. During the night, moderate and weak optical turbulence occurs. From February to September, strong turbulence is most frequent at noon. It is worth mentioning that during the whole measurement campaign there were only a few cases with  $C_n^2 > 10^{-13}$  that could indicate the possibility of visible image blurring.

The annual and diurnal course of  $C_n^2$  seems to have several features that are characteristic for urban areas. Frequent occurrence of moderate turbulence during the night could result from the urban heat island effect. The heat stored in urban areas during the day is slowly released after the sunset and the anthropogenic heat flux can enhance the vertical heat exchange. This, in turn, can result in the increase of  $C_n^2$  (i.e. the optical turbulence intensity).