

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 64, 2014: 131–139  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 64, 2014)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 64, 2014: 131–139  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 64, 2014)

**Włodzimierz PAWLAK**

Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Łódzki  
Department of Meteorology and Climatology, University of Łódź

**Wymiana turbulencyjna dwutlenku węgla między atmosferą a terenem zurbanizowanym, rolniczym i podmokłym – różnice w rocznej i dobowej zmienności\***  
**Turbulent exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the urbanized area, agricultural area and wetland – the differences in the annual and diurnal variability**

**Słowa kluczowe:** dwutlenek węgla, strumień turbulencyjny, metoda kowariancji wirów  
**Key words:** carbon dioxide, turbulent flux, eddy covariance method

**Wprowadzenie**

Obieg dwutlenku węgla w przyrodzie oraz wpływ tego procesu na klimat oraz jego zmiany jest jednym z najszerzej dyskutowanych problemów współczesnej klimatologii. Intensywne badania od wielu lat koncentrują się na analizie rosnącego stężenia tego gazu w powietrzu, a od około 25 lat (Wofsy i inni, 1993) są prowadzone również pomiary wymiany

dwutlenku węgla między podłożem a atmosferą (Aubinet, Vesala i Papale, 2012). Zaawansowane logistycznie i metodycznie metody komorowe, a zwłaszcza metoda kowariancji wirów, pozwoliły na wyznaczenie dobowej, sezonowej i rocznej wymiany dwutlenku węgla. Badania te pozwalają również na ocenę roli, jaką pełni badana powierzchnia (sposób jej użytkowania oraz stopień jej przekształcenia przez człowieka), na intensywność i kierunek wymiany dwutlenku węgla między podłożem a troposferą (Aubinet i inni, 2012). Pomiary strumienia turbulencyjnego dwutlenku węgla nad różnymi powierzchniami są prowadzone na całym świecie, przy czym liczba stanowisk pomiarowych nad terenami naturalnymi (las, łąki, tereny podmokłe)

\*Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2015 jako projekty badawcze nr N N306 519638 oraz UMO-2011/01/B/ST10/07550.

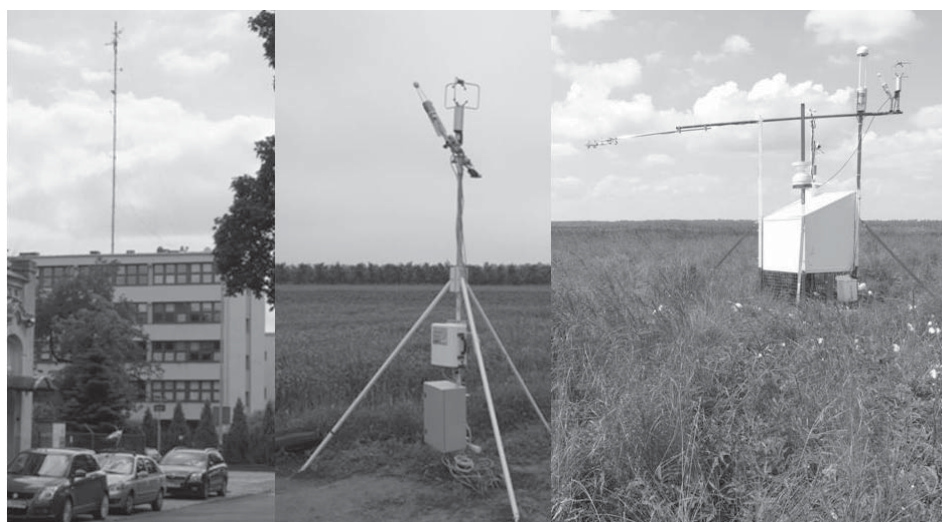
i paranaturalnymi (tereny użytkowane rolniczo) jest zdecydowanie większa niż nad stanowiskami miejskimi, których w chwili obecnej funkcjonuje na świecie jedynie około 20 (Aubinet i inni, 2012). Badania o charakterze porównawczym prowadzone jednocześnie nad różnymi powierzchniami wciąż należą do rzadkości. W Katedrze Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Łódzkiego pomiary strumieni turbulencyjnych dwutlenku węgla są prowadzone od 2002 roku (Fortuniak, 2003; Offerle, 2003; Offerle, Grimmond, Fortuniak, Kłysik i Oke, 2006a; Offerle, Grimmond, Fortuniak i Pawlak, 2006b; Fortuniak, 2010; Pawlak, Fortuniak i Siedlecki, 2011). W sposób ciągły stanowiska pomiarowe pracują w centrum Łodzi (od 2006 roku), na polu uprawnym (od 2011 roku) oraz terenie podmokłym (od 2012 roku). Celem opracowania jest prezentacja różnic w rocznym i dobowym przebiegu stru-

mienia turbulencyjnego dwutlenku węgla nad wymienionymi powierzchniami w latach 2011–2013.

### Material i metody

Pomiary strumienia turbulencyjnego netto dwutlenku węgla zostały przeprowadzone nad powierzchniami w odmiennym stopniu użytkowanymi przez człowieka. Jeden z zestawów pomiarowych zainstalowano na terenie zurbanizowanym w centrum Łodzi, na maszcie na wysokości 37 m nad gruntem, 26 m nad powierzchnią dachową (rys. 1).

Zgodnie z metodyką pomiarów strumieni turbulencyjnych na terenach zurbanizowanych, umieszczenie przyrządów na znacznej wysokości (co najmniej dwukrotnie przewyższającej średnią wysokość budynków w otoczeniu punktu pomiarowego) eliminuje zaburzenia



RYSUNEK 1. Stanowiska pomiarowe strumienia turbulencyjnego netto dwutlenku węgla – od lewej miasto, pole uprawne i bagno  
FIGURE 1. Measurement sites of carbon dioxide turbulent net flux – from left to right city, field and wetland

przepływu powietrza nad budynkami oraz umożliwia otrzymanie wartości strumienia uśrednionego dla powierzchni o średnicy około 1 km (Lee, Massman i Law, 2004; Foken, 2008; Fortuniak, 2010; Aubinet i inni, 2012; Fortuniak, Pawlak i Siedlecki, 2013). Pozostałe dwa stanowiska umieszczono na polu uprawnym (Annosław k. Rawy Mazowieckiej, około 70 km na wschód od Łodzi, mieszanka pól ze zbożami, z owocami i warzywami) oraz na bagnach Biebrzańskiego Parku Narodowego (teren podmokły z turzycami i szuwarem). W obu przypadkach przyrządy były umieszczone niżej, na wysokości odpowiednio 3,3 oraz 3,7 m (tab. 1), ponieważ roślinność pokrywająca badane powierzchnie jest zdecydowanie niższa od zabudowań w mieście. Obszary źródłowe strumieni turbulencyjnych, wyznaczone metodą Schmid (Schmid, 1994), obejmowały obszary o średnicy około 500 m.

We wszystkich trzech przypadkach do pomiarów strumienia turbulencyjnego dwutlenku węgla ( $FCO_2$ ) zastosowano bardzo zaawansowaną metodologicznie, ale jednocześnie najdokładniejszą i najkorzystniejszą dla badań długookresowych, metodę kowariancji wirów (ang.

eddy covariance method). Zgodnie z teoretycznymi podstawami tej metody (Lee i inni, 2004; Foken, 2008; Fortuniak, 2010; Aubinet i inni, 2012) strumień badanej wielkości (w tym przypadku dwutlenku węgla) wyliczany jest wprost z definicji jako kowariancja fluktuacji pionowej prędkości wiatru ( $w'$ ) oraz stężenia dwutlenku węgla w powietrzu ( $\rho CO_2'$ ):

$$FCO_2 = \overline{w' \rho CO_2'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w'_i - \bar{w})(\rho CO_2'_i - \overline{\rho CO_2'})$$

Strumień ten ma charakter netto, co oznacza, że mierzona jest jednocześnie wymiana od powierzchni czynnej do atmosfery i odwrotnie. Wartość strumienia wyliczona dla pewnego przedziału czasu (w tym przypadku 1 godzina) wskazuje na przewagę wymiany od powierzchni czynnej do atmosfery (strumień dodatni, emisja dwutlenku węgla) lub od atmosfery do powierzchni czynnej (strumień ujemny, pobór dwutlenku węgla).

Na wszystkich stanowiskach pomiarowych zastosowano podobny zestaw przyrządów. Fluktuacje pionowej prędkości

TABELA 1. Podstawowe charakterystyki punktów pomiarowych  
TABLE 1. Basic characteristics of measurements sites

Wyszczególnienie Specification	Wysokość pomiaru Measurement height	Średnia wysokość zabudowy/roślin Mean height of buildings/plants	Udział powierzchni sztucznych Percentage of artificial areas
	m	m	%
Miasto City	37,0	11,0	62,0
Pole Field	3,3	0,1–0,4	<1
Bagno Wetland	3,7	0,4–0,1	<1

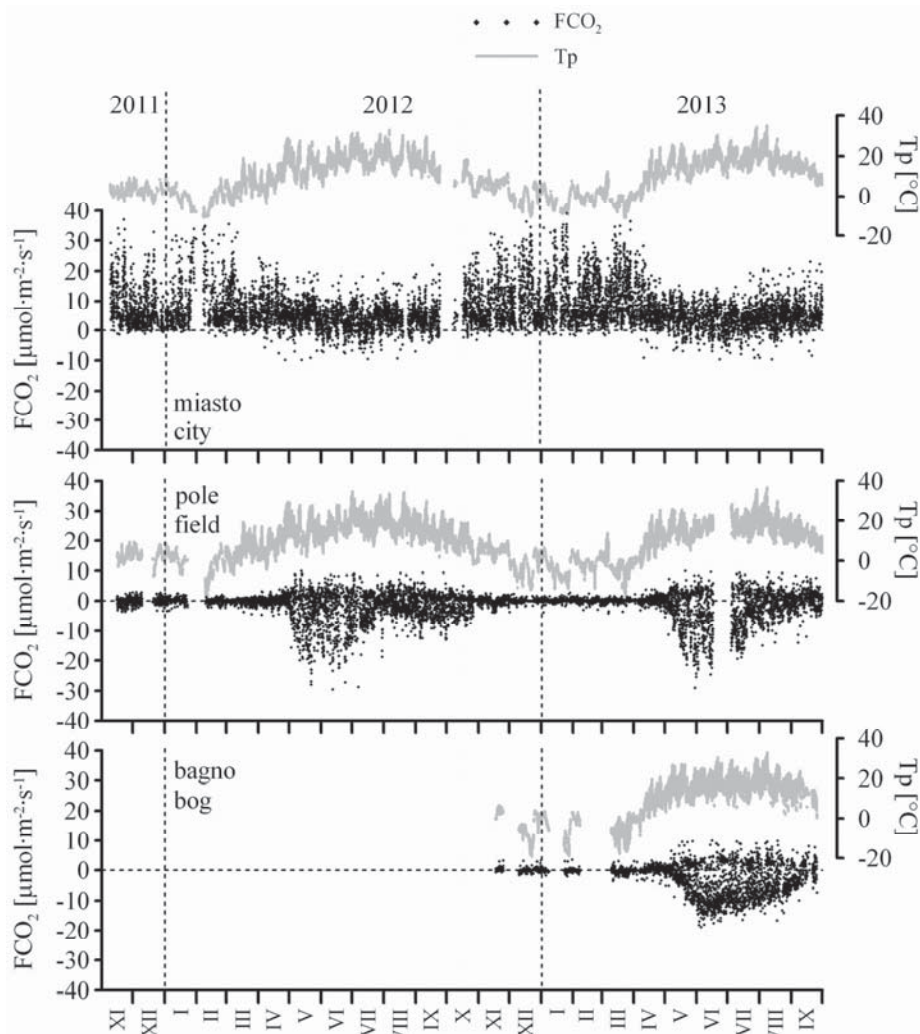
kości wiatru zmierzono za pomocą anemometru sonicznego RMYoung 81000 (RMYoung, USA), a fluktuacje stężenia dwutlenku węgla w powietrzu za pomocą analizatorów gazowych Li7500 (miasto, bagno) lub Li7500A (pole) (Li-cor, USA). Dane były rejestrowane za pomocą dataloggerów CR5000 i CR21X (Campbell Scientific, USA). Zgodnie z rozwijaną od co najmniej 20 lat metodą pomiarów strumieni turbulencyjnych netto, w trakcie pomiarów opisanych w pracy zastosowano wszystkie konieczne poprawki i korekcje (Lee i inni, 2004; Foken, 2008; Fortuniak, 2010; Aubinet i inni, 2012). Pomiary przeprowadzono z częstotliwością 10 Hz. Przed wyliczeniem właściwych strumieni odrzucono dane o niepoprawnych wartościach (również te zmierzone podczas występowania opadów i osadów atmosferycznych), przeprowadzono procedurę rotacji układu współrzędnych wiatru, dodano poprawkę na pomiar temperatury powietrza przez anemometr soniczny w zależności od wilgotności, zniwelowano wpływ odległości między przyrządami, stosując procedurę maksymalizacji kowariancji oraz dodano tzw. poprawkę WPL konieczną ze względu na zmiany gęstości powietrza w trakcie pomiarów (Webb, Pearman i Leuning, 1980). W trakcie obliczeń szeregi danych poddano ocenie jakości poprzez sprawdzenie ich stacjonarności. Zastosowano trzy różne testy (Fortuniak, 2010), przy czym wartość strumienia była uznawana za prawidłową, jeżeli co najmniej jeden z testów sugerował zachowanie stacjonarności. Do obliczeń zastosowano kody własne napisane w języku Fortran 77. Dane odrzucone ze względu na problemy ze sprzętem oraz obecność opadów lub osa-

dów atmosferycznych stanowiły w mieście 25,6%, 22,8% – na polu oraz 21,1% – na bagnie. Odpowiednio 12,0, 17,4 i 16,2% danych zostało dorzuconych ze względu na sugerowane przez testy niespełnienie warunku o stacjonarności.

## Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że wymiana turbulencyjna dwutlenku węgla nad badanymi trzema powierzchniami ma cechy wspólne. Niezależnie od sposobu użytkowania powierzchni oraz udziału powierzchni sztucznych zaobserwowano wyraźny, skorelowany z temperaturą powietrza, roczny oraz dobowy rytm strumienia turbulencyjnego dwutlenku węgla (rys. 2). Zmienność wymiany dwutlenku węgla nad badanymi powierzchniami jest determinowana jednak przez różne procesy, dlatego są obserwowane znaczące różnice w przebiegach  $FCO_2$ . Na terenie zurbanizowanym najistotniejszym czynnikiem kształtującym wymianę dwutlenku węgla jest emisja antropogeniczna związana ze spalaniem paliw kopalnych (ruch samochodowy, ogrzewanie mieszkań, gotowanie itd.), podczas gdy procesy biologiczne, takie jak pochłanianie dwutlenku węgla przez rośliny i emisja podczas oddychania, mają mniejsze znaczenie ze względu na niewielki, rzędu 38% (Kłysik, 1998), udział roślinności w centrum Łodzi (tab. 1).

W centrum Łodzi maksymalne wartości  $FCO_2$  są obserwowane w zimie, zwłaszcza w dniach z niskimi temperaturami powietrza (rys. 2). W badanym okresie typowe wartości  $FCO_2$  sięgały w zimie 20–30  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,



RYSUNEK 2. Zmienność strumienia turbulencyjnego netto dwutlenku węgla ( $FCO_2$ ) oraz temperatury powietrza ( $Tp$ ) w okresie od listopada 2011 do września 2013 roku w centrum miasta, na polu uprawnym oraz bagnie

FIGURE 2. The variability of carbon dioxide turbulent net flux ( $FCO_2$ ) and air temperature ( $Tp$ ) in the period November 2011 to September 2013 in the city center, on the field and wetland

a w dniach z temperaturą rzędu  $-10^{\circ}\text{C}$  nawet  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . W chłodnej porze roku nie obserwuje się strumieni ujemnych, co oznacza, że w tym czasie miasto jest źródłem netto dwutlenku węgla dla atmosfery. W cieplej porze roku wymiana turbulencyjna net-

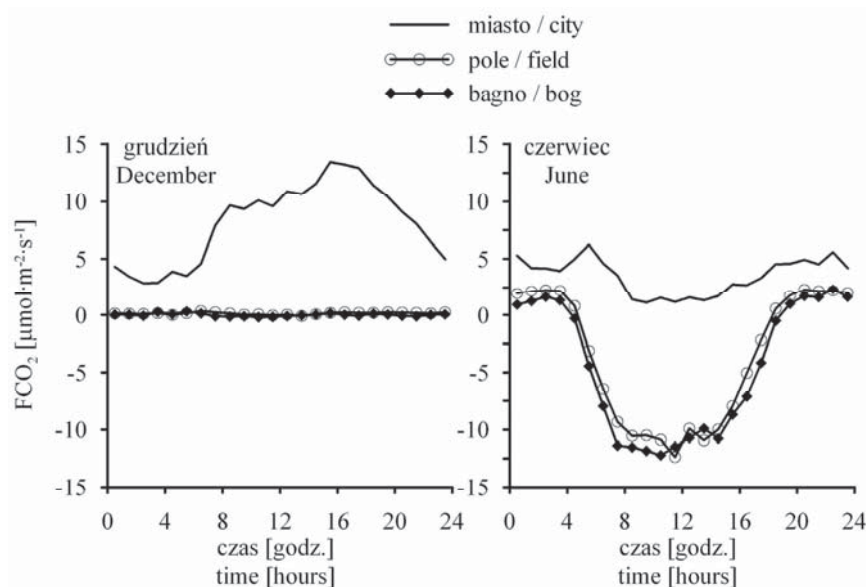
to dwutlenku węgla w mieście traci na intensywności, a strumienie osiągają wartości rzędu  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pojawiają się również wartości ujemne, co oznacza, że pojawiają się epizody, kiedy pobór  $\text{CO}_2$  z atmosfery przeważa nad emisją. Na kształtowanie się strumienia

turbulencyjnego  $\text{CO}_2$  w cieplej porze roku w centrum Łodzi wpływa osłabiona emisja antropogenicznego dwutlenku węgla (brak ogrzewania domów, mniejszy ruch samochodowy podczas wakacji) oraz obecność rozwiniętej roślinności miejskiej. Mimo iż na badanym fragmencie centrum Łodzi obszary pokryte roślinnością stanowią tylko 38% (z czego drzewa to jedynie 10% – Kłysik, 1998), jest to udział wystarczający, aby zniwelować emisję antropogenicznego  $\text{CO}_2$  oraz spowodować zmianę kierunku strumienia w dniach z dobrymi warunkami dla fotosyntezy. Na terenach zamiejskich roczny rytm zmienności  $FCO_2$  jest również skorelowany z temperaturą powietrza (rys. 2). Na polu uprawnym oraz bagnie największa intensywność wymiany została odnotowana w cieplej porze roku, kiedy to wartości  $FCO_2$  sięgały  $-30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (na polu) oraz  $-20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (na bagnie). Ponieważ na badanych terenach emisja antropogenicznego dwutlenku węgla jest znikoma (tab. 1), o wymianie decydują procesy biologiczne, które determinują intensywny pobór  $\text{CO}_2$  towarzyszący fotosyntezie. W 2012 roku na polu uprawnym oprócz maksimum w  $FCO_2$  w maju i czerwcu zaobserwowano wtórne maksimum na początku jesieni (rys. 2). Jego pojawienie się jest związane z wysianiem poplonów po żniwach na przełomie lipca i sierpnia. Na bagnie taka zmienność nie jest obserwowana ze względu na brak ingerencji człowieka w roślinność na badanym fragmencie Biebrzańskiego Parku Narodowego. W chłodnej porze roku zarówno na polu uprawnym, jak i na bagnie wymiana wyraźnie traci na intensywności i osiąga wartości rzędu  $\pm 5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Niskie temperatury

powietrza oraz zamrożona (na polu) lub zlodzona (na bagnie) powierzchnia czynna powodują, że zanikają procesy biologiczne odpowiedzialne za wymianę dwutlenku węgla na terenach pokrytych roślinnością.

Zróznicowanie źródeł dwutlenku węgla determinujących zmienność roczną  $FCO_2$  wpływa również na kształtowanie się przebiegów dobowych w ciągu roku. Na polu uprawnym oraz bagnie w czerwcu zmienność  $FCO_2$  ma wyraźny dobowy przebieg z maksimum w godzinach południowych (rys. 3). Silne pochłanianie dwutlenku węgla podczas fotosyntezy zdecydowanie przewyższa uwalnianie się tego gazu podczas oddychania ekosystemu. Średnie wartości w godzinach południowych w czerwcu sięgały  $-12 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (na polu) oraz  $-13 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (na bagnie). W nocy wartości strumienia były dodatnie, ale nie tak wysokie, jak w dzień (do  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  na polu oraz  $4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  na bagnie), ponieważ wydajność procesu oddychania jest mniejsza od fotosyntezy. W grudniu średnia wartość  $FCO_2$  oscylowała wokół 0.

W centrum miasta wyraźny przebieg dobowy został zaobserwowany w zimie (rys. 3). Średnia wartość  $FCO_2$  w grudniu jest dodatnia niezależnie od pory dnia, co oznacza, że w tym czasie centrum Łodzi jest źródłem dwutlenku węgla dla atmosfery w ciągu całej doby. Największe wartości pojawiają się w ciągu dnia, przy czym można wyróżnić dwa maksima: około 8.00 oraz 16.00. Zmienność ta jest efektem emisji dwutlenku węgla podczas porannego i popołudniowego szczytu ruchu samochodowego w okolicach punktu pomiarowego. Po godzinie 16.00 wartość strumienia



RYSUNEK 3. Średnia dobowa zmienność strumienia turbulencyjnego netto dwutlenku węgla ( $FCO_2$ ) w grudniu i czerwcu w centrum miasta, na polu uprawnym oraz bagnie  
 FIGURE 3. Average diurnal variability of carbon dioxide turbulent net flux ( $FCO_2$ ) in December and June in the city center, on the field and wetland

powoli spada aż do godzin późnowieczornych, ponieważ emisja  $CO_2$  związana ze słabnącym w godzinach wieczornych ruchem samochodowym jest zastępowana przez spalanie paliw kopalnych będące efektem aktywności mieszkańców centrum Łodzi w mieszkaniach (ogrzewanie, gotowanie itd.). Średni przebieg dobowy w centrum Łodzi w czerwcu jest z kolei dużo mniej zróżnicowany, a wartości  $FCO_2$  nie przekraczają  $6-7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ograniczona w ciepłym sezonie emisja antropogenicznego dwutlenku węgla w znacznym stopniu jest kompensowana przez rośliny, które silnie pochłaniają dwutlenek węgla podczas fotosyntezy. Powierzchnia pokryta roślinami stanowi w centrum Łodzi jedynie około 38%, co powoduje, że emisja antropogeniczna nie może być całkowicie skompensowana, dlatego również w czerwcu badany

fragment miasta stanowi źródło  $CO_2$  dla atmosfery, jednak o znacznie mniejszej intensywności niż w zimie.

### Podsumowanie

Pomiary przeprowadzone w latach 2011–2013 nad trzema powierzchniami wyraźnie wskazują na zależność między typem powierzchni oraz udziałem powierzchni sztucznych a intensywnością i kierunkiem wymiany turbulencyjnej netto dwutlenku węgla. Cechy dobowej i rocznej wymiany  $CO_2$  są odmienne zarówno w skali rocznej, jak i w ciągu doby w skrajnych porach roku. Na terenach o znikomym udziale odsetku powierzchni sztucznych istotna jest również ingerencja człowieka w rozwój roślinności. Zmienność strumienia

dwutlenku węgla ( $FCO_2$ ) w centrum Łodzi bardzo dobrze oddaje intensywność wymiany  $CO_2$  na terenach zurbanizowanych. Centrum miasta należy jednak uznać za przypadek skrajny, nieoddający zmienności wymiany na terenie całego miasta. W dzielnicach o odmiennym typie zabudowy (np. dzielnice z niską zabudową jednorodziną) i przy większym udziale roślinności, należy spodziewać się, że wymiana podczas procesów biologicznych skompensowałaby emisję o charakterze antropogenicznym.

## Literatura

- Aubinet, M., Vesala, T. i Papale, D. (2012). *Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Dordrecht Heidelberg Londyn Nowy Jork: Springer.
- Foken, T. (2008). *Micrometeorology*. Berlin: Springer.
- Fortuniak, K. (2003). *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*. Łódź: Wydawnictwo UŁ.
- Fortuniak, K. (2010). *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*. Łódź: Wydawnictwo UŁ.
- Fortuniak, K., Pawlak, W. i Siedlecki, M. (2013). Integral turbulence statistics over a central european city centre. *Boundary-Layer Meteorology*, 146, 257-276.
- Kłysik, K. (1998). Charakterystyka powierzchni miejskiej Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica*, 3, 173-185.
- Lee, X., Massman, W. i Law, B. (2004). *Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Offerle, B.D. (2003). *The energy balance of an urban area: Examining temporal and spatial variability through measurements, remote sensing and modelling* (Maszynopis rozprawy doktorskiej w języku angielskim).
- Offerle, B.D., Grimmond, C.S.B., Fortuniak, K., Kłysik, K. i Oke, T.R. (2006a). Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 103-115.
- Offerle, B.D., Grimmond, C.S.B., Fortuniak, K. i Pawlak, W. (2006b). Intra-urban differences of surface energy fluxes in a central European city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 125-136.
- Pawlak, W., Fortuniak, K. i Siedlecki, M. (2011). Carbon dioxide flux in the centre of Łódź, Poland – analysis of a 2-year eddy covariance measurements data set. *International Journal of Climatology*, 31, 232-243.
- Schmid, H.P. (1994). Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 67, 293-318.
- Webb, E.K., Pearman, G.I. i Leuning, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 85-100.
- Wofsy, S.C., Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.M., Bakwin, P.S., Daube, B.C., ... Bazzaz, F.A. (1993). Net Exchange of  $CO_2$  in a Mid-Latitude Forest. *Science*, 260, 1314-1317.

## Streszczenie

**Wymiana turbulencyjna dwutlenku węgla między atmosferą a terenem zurbanizowanym, rolniczym i podmokłym – różnice w rocznej i dobowej zmienności.** Opracowanie zawiera analizę wyników równoczesnych pomiarów wymiany turbulencyjnej netto dwutlenku węgla między atmosferą a powierzchniami w różnym stopniu przekształconymi przez człowieka (miasto, pole uprawne i bagno). Strumień turbulencyjny  $CO_2$  był mierzony z zastosowaniem metody kowariancji wirów w okresie od listopada 2011 roku (miasto i pole) oraz listopada 2012 roku (bagno) do września 2013 roku. Wyniki potwierdzają znaną z literatury zależność między sposobem użytkowania powierzchni a intensywnością wymiany turbulencyjnej  $CO_2$ . Różnice w intensywności badanego procesu zaobserwowane na terenie zurbani-



zowanym oraz naturalnym lub paranaturalnym są widoczne zarówno w rocznej, jak i dobowej zmienności. Niezależnie od pory roku centrum miasta jest źródłem dwutlenku węgla dla troposfery. Tereny użytkowane rolniczo i tereny podmokłe w minimalnym stopniu emitują ten gaz w sezonie chłodnym, podczas gdy w cieplej połowie roku, ze względu na rozwój roślinności, intensywnie pobierają dwutlenek węgla. Maksymalne zaobserwowane wartości strumienia dwutlenku węgla ( $FCO_2$ ) sięgały  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (centrum miasta),  $-30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (pole uprawne) oraz  $-20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (bagno).

## Summary

**Turbulent exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the urbanized area, agricultural area and wetland – the differences in the annual and diurnal variability.** The presented study aim at analyzing the results obtained by simultaneous measurements of carbon dioxide net exchange between the atmosphere and the surfaces transformed to the different degree by human activities (city, field and wetland). Turbulent flux of  $CO_2$  was measured using

the eddy covariance method during the period from November 2011 (city and field) and November 2012 (wetland) to September 2013. The results confirm a relationship between the land use and the intensity of turbulent exchange of  $CO_2$  known from the literature. The differences in the intensity of this process observed in urban, natural and agricultural areas are clearly noticeable both in the annual and diurnal variability. Irrespective of the season the city center is a source of carbon dioxide in the troposphere. Agricultural area and wetland are slight emitters of this gas in the cool season, while in the warm part of the year, due to the vegetation growth, they absorb carbon dioxide intensively. The maximum of observed  $CO_2$  flux ( $FCO_2$ ) values amounted for  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (city center),  $-30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (field) and  $-20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (bog).

### Author's address:

Włodzimierz Pawlak  
Uniwersytetu Łódzki  
Katedra Meteorologii i Klimatologii  
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź  
Poland  
e-mail: wpawlak@uni.lodz.pl