

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 17.01.2012 r.
Zaakceptowano 17.02.2012 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

TYP POWIERZCHNI MIEJSKIEJ A TURBULENCYJNA WYMIANA DWUTLENKU WĘGLA (NA PRZYKŁADZIE ŁODZI)

Włodzimierz PAWLAK^{ABCDEF}, Mariusz SIEDLECKI^{BCD}

Uniwersytet Łódzki, Katedra Meteorologii i Klimatologii

Streszczenie

Celem opracowania jest porównanie intensywności turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla na terenie miejskim o różnym typie zabudowy. Pomiary przeprowadzono w gęsto zabudowanym centrum miasta, w dzielnicy domów jednorodzinnych, na terenie przemysłowym oraz podmiejskim. Uzyskane wyniki potwierdzają wyraźną zależność między gęstością i typem zabudowy oraz odsetkiem powierzchni roślinnych a intensywnością i zwrotem wymiany. Najbardziej intensywną dodatnią (do atmosfery) wymianę dwutlenku węgla zaobserwowano w centrum Łodzi oraz, nieco mniejszą, na obszarze przemysłowym, podczas gdy w dzielnicy niskiej zabudowy, jedno- i dwupiętrowej, z dużym udziałem terenów zielonych, antropogeniczna emisja CO₂ była w znacznej mierze równoważona przez naturalny pobór tego gazu przez rośliny. Na terenie podmiejskim z kolei wymiana miała charakter zdecydowanie ujemny (do powierzchni czynnej), ze względu na bardzo mały udział antropogenicznej emisji dwutlenku węgla.

Słowa kluczowe: metoda kowariancji wirów, teren zurbanizowany, turbulencyjny strumień dwutlenku węgla

WSTĘP

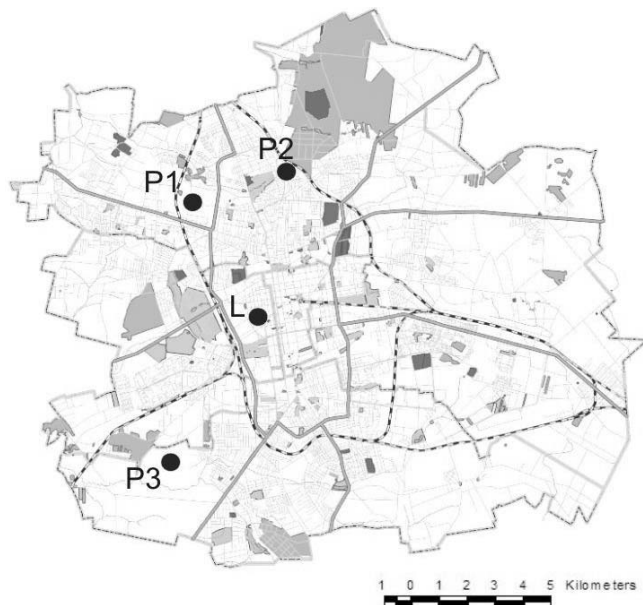
Na podstawie prowadzonych od wielu lat badań stwierdzono, że w przypowierzchniowej warstwie powietrza nad miastami poziom stężenia dwutlenku węgla jest podwyższony [COUTTS i in. 2007; GRIMMOND i in. 2002; HELFER i in. 2010; VESALA i in. 2008]. Miasta, ze względu na gęstość zabudowy, sieci transportowe, zmniejszony udział terenów zielonych oraz ogromne zużycie energii, znacząco modyfikują obieg węgla w środowisku w porównaniu z terenami niezurbanizowa-

nymi [CRAWFORD i in. 2011; KORDOWSKI, KUTTLER 2010; MATESE i in. 2009; MORIWAKI, KANDA 2004; NEMITZ i in. 2002; OFFERLE 2003; PAWLAK i in. 2011; VELASCO i in. 2005; VELASCO, ROTH 2010; VOGT i in. 2006]. Dobowy rytm obserwowany na terenach naturalnych lub rolniczych, zdominowany przez nocne uwalnianie dwutlenku węgla przez rośliny i dzienne pochłanianie podczas fotosyntezy, na terenie miejskim jest zaburzony przez intensywną antropogeniczną emisję CO₂, towarzyszącą spalaniu paliw kopalnych podczas ogrzewania mieszkań oraz w ruchu samochodowym. Emisja ta jest w pewnym stopniu równoważona podczas poboru dwutlenku węgla w trakcie procesów biologicznych, w których bierze udział roślinność miejska. Ze względu jednak na to, że udział terenów zielonych na obszarach miejskich jest często bardzo mały, proces ten nie jest w stanie całkowicie zrównoważyć emisji o charakterze antropogenicznym [COUTTS i in. 2007; CRAWFORD i in. 2011; KORDOWSKI, KUTTLER 2010; PAWLAK i in. 2011; VELASCO, ROTH 2010]. Ciągłe pomiary wymiany dwutlenku węgla między powierzchnią miejską a troposferą są więc niezbędne do oszacowania, zarówno naturalnej, jak i antropogenicznej, emisji tego gazu do atmosfery. Z badań przeprowadzonych dotychczas w kilkunastu miastach położonych w strefie umiarkowanej wynika, że tereny zurbanizowane, a zwłaszcza centra miast, są źródłem dwutlenku węgla w ciągu całego roku [VELASCO, ROTH 2010]. Powierzchnia miejska ma jednak charakter niejednorodny, a gęstość zabudowy, udział powierzchni sztucznych oraz natężenie transportu najczęściej zwiększa się od terenów podmiejskich w kierunku centrum. Należy się spodziewać, że te czynniki będą wpływać na intensywność wymiany CO₂ w różnych częściach miasta, dlatego celem opracowania jest porównanie intensywności turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla na terenie miejskim o odmiennym typie zabudowy.

OBSZAR I METODY BADAŃ

Łódź jest trzecim co do wielkości miastem Polski, a liczbę jego mieszkańców szacuje się obecnie na około 740 tys. Zabudowę miasta można uznać za typową dla miast europejskich – gęsto zabudowane centrum jest otoczone dzielnicami przemysłowymi, mieszkaniowymi, domów jednorodzinnych itd. Cechami bardzo istotnymi ze względu na badanie klimatu miasta są względnie płaski teren, na jakim miasto jest położone oraz brak w bezpośrednim sąsiedztwie rzek, jezior czy przeszkód orograficznych, których wpływ na lokalny klimat należałoby uwzględnić.

Pomiary turbulencyjnej wymiany strumienia dwutlenku węgla przeprowadzono na czterech stanowiskach, położonych w dzielnicach o zróżnicowanych cechach powierzchni czynnej. Za punkt odniesienia uznano stację pomiarową położoną w zachodniej części centrum miasta, przy ulicy Lipowej 81 (punkt pomiarowy L, rys. 1, tab. 1, rys. 2). W otoczeniu tego punktu dominuje gęsta zabudowa z pierwszej połowy XX w., o średniej wysokości 10,2 m (tab. 1). W odległości nieprzekra-



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla w Łodzi (L – w centrum miasta, ulica Lipowa, P1 – dzielnica poprzemysłowa, P2 – dzielnica domów jednorodzinnych, P3 – strefa podmiejska); źródło mapy: Miejski Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Łodzi

Fig. 1. Location of measurement points of carbon dioxide flux in Łódź (L – city centre, P1 – postindustrial district, P2 – residential district, P3 – suburban area); source of map: Municipal Centre of Geodesy and Cartographic Documentation of Łódź

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla w Łodzi

Table 1. Basic characteristics of measurement points of carbon dioxide flux in Łódź

Punkt pomiarowy Measurement site	Okres pomiarowy Measurement period	Wysokość pomiarów z_H Measurement height z_H m	Współczynnik szorstkości z_0 Roughness coefficient z_0 m	Średnia wysokość budynków Mean buildings height m	Udział powierzchni sztucznych % Percent of artificial surfaces	Udział powierzchni roślinnych % Percent of plant cover %
L	07.2006–05.2011	37	2,5	10,2	~60	~40
P1	10–12.2002	23	1,36	8,5	~40	~60
P2	08.2002	41	0,72	7,7	~30	~70
P3	05–07.2003	2	0,15	0	~5	~95

Źródło: KLYSIK [1998], OFFERLE [2003] i wyniki własne.

Source: KLYSIK [1998], OFFERLE [2003] and own studies.

czającej 500 m od punktu pomiarowego udział powierzchni sztucznych (budynki, ulice, chodniki, place itd.) sięga 60%, podczas gdy tereny zielone zajmują około 40%, w tym drzewa jedynie 10% [FORTUNIAK 2010; KŁYSIK 1998]. Pomiary przy ulicy Lipowej są prowadzone w sposób ciągły od lipca 2006 roku. Pozostałe punkty pomiarowe zlokalizowano w dzielnicach o odmiennych cechach powierzchni czynnej [FORTUNIAK 2010; OFFERLE 2003; OFFERLE i in. 2006; PAWLAK i in. 2007] (rys. 1, 2, tab. 1).

Pomiary turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla w okresie od października do grudnia 2002 r. przeprowadzono na stanowisku przy ulicy Brukowej w dzielnicy przemysłowej (punkt pomiarowy P1, rys. 1, 2). Średnia wysokość budynków w otoczeniu stanowiska była tam nieco mniejsza i wynosiła 8,5 m, nieco mniejszy był też udział powierzchni sztucznych – rzędu 40% (tab. 1). Kolejne dwa punkty pomiarowe zlokalizowano w dzielnicach o wyraźnej przewadze terenów zielonych nad powierzchniami sztucznymi. Punkt P2, w którym pomiary przeprowadzono w sierpniu 2002 r., jest położony w dzielnicy domów jednorodzinnych przy ulicy Łagiewnickiej (rys. 1, 2) i charakteryzuje się odsetkiem terenów zielonych rzędu 70%. W przypadku punktu P3, położonego w strefie podmiejskiej na pokrytej trawą płycie Portu Lotniczego im. W. Reymonta, odsetek ten był największy i sięgał 95% (tab. 1, rys. 1, 2). Pomiary w tym punkcie prowadzono od maja do lipca 2003 r.

Wymiana dwutlenku węgla (a także energii oraz innych gazów) zachodzi między atmosferą a powierzchnią czynną w wyniku transportu turbulencyjnego, dlatego pomiary prowadzono, uznawaną obecnie za najdokładniejszą, metodą kowariancji wirów (ang. “eddy covariance method”) [FORTUNIAK 2010; LEE i in. 2004]. W metodzie tej strumień dwutlenku węgla F_{CO_2} (lub innego gazu) jest obliczany wprost z definicji jako kowariancja szeregów fluktuacji pionowej prędkości wiatru oraz stężenia dwutlenku węgla w powietrzu:

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

gdzie:

- w', ρ_{CO_2}' – fluktuacje pionowej prędkości wiatru i stężenia CO_2 w powietrzu w przedziale czasu o długości N ,
- $\bar{w}, \overline{\rho_{CO_2}}$ – średnie wartości pionowej prędkości wiatru i stężenia CO_2 w tym samym przedziale czasu o długości N .

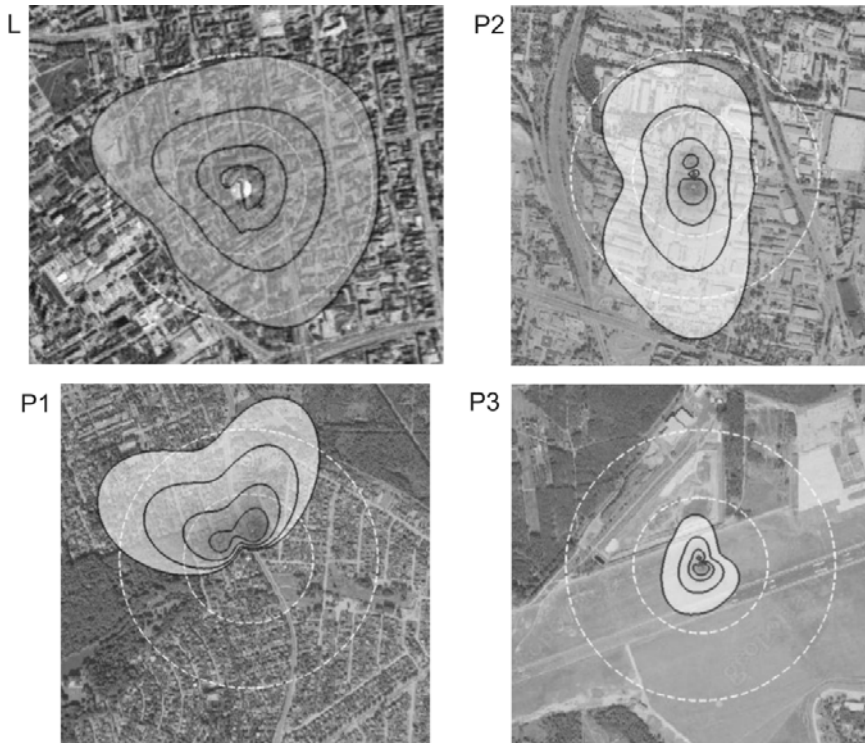
Zaletą metody jest jej duża dokładność, wynikająca z możliwości obliczenia strumienia wprost z definicji, bez konieczności uwzględniania współczynników empirycznych, co było poważną wadą starszych metod [FORTUNIAK 2003; 2010]. Ponadto metoda umożliwia wyznaczenie nie tylko wartości strumienia w pewnym przedziale czasu, ale również jego zwrotu. Ujemna wartość F_{CO_2} oznacza, że jest obserwowana przewaga procesu pochłaniania nad emisją i wypadkowy strumień

netto jest skierowany w dół (od atmosfery do powierzchni czynnej). Strumień dodatni oznacza transport netto w odwrotnym kierunku, czyli emisję z powierzchni czynnej do atmosfery (przewaga emisji nad pochłanianiem).

Mimo prostoty stosowanie metody w praktyce napotyka na trudności natury metodycznej, z których najważniejsze są związane z koniecznością pomiaru wartości w' oraz ρ_{CO_2} z częstotliwością co najmniej 10 Hz. Wymaga to stosowania zaawansowanych czujników pomiarowych i znacznie zwiększa koszty eksperymentów. Innym utrudnieniem w stosowaniu metody na terenie zabudowanym jest konieczność instalacji czujników pomiarowych na pewnej wysokości ponad zabudowę. W ten sposób zmierzony strumień ma charakter uśredniony i odnosi się do pewnej powierzchni, a nie do pojedynczego elementu zabudowy. Z tego względu we wszystkich punktach badawczych czujniki pomiarowe były zawieszane na wysokości co najmniej dwukrotnie przewyższającej średnią wysokość budynków (tab. 1), co – zgodnie z metodyką pomiarów strumieni turbulencyjnych na terenach miejskich [FORTUNIAK 2010; GRIMMOND, OKE 1999; PAWLAK i in. 2011] – umożliwia przyjęcie założenia, że pomiary były prowadzone powyżej przypowierzchniowej warstwy tarcia.

W celu dodatkowej weryfikacji reprezentatywności pomiarów w każdym punkcie pomiarowym oceniono tzw. obszar źródłowy strumieni turbulencyjnych w warunkach stratyfikacji chwiejnej [FORTUNIAK 2009; PAWLAK i in. 2011; SCHMID 1994]. Wyniki (rys. 2) potwierdzają, że obliczone strumienie odnoszą się do fragmentów powierzchni miejskiej o średnicy do 1000 m. Jedynie w przypadku strefy podmiejskiej obszar źródłowy był mniejszy, co wynika z tego że nad jednorodnymi powierzchniami, np. trawiastymi, na których przeszkody oddziałujące na przepływ powietrza mają mniej niż 1 m wysokości, czujniki można instalować na niewielkiej wysokości, rzędu 3–4 m.

Do pomiarów zastosowano standardowy zestaw, składający się z anemometru ultradźwiękowego RMYoung 81000 (RMYoung, USA) oraz analizatora gazowego dwutlenku węgla Li7500 IRGA CO₂/H₂O (Li-cor, USA). Przyrządy rejestrowały fluktuacje badanych wielkości z częstotliwością 10 Hz, a za przedział uśredniania strumienia F_{CO_2} przyjęto 1 godzinę. Przed obliczeniem końcowych wartości strumienia przeprowadzono, zgodnie z metodyką proponowaną w literaturze, analizę jakości danych oraz wprowadzono odpowiednie poprawki [FORTUNIAK 2010; LEE i in. 2004]. Przeprowadzono analizę stacjonarności danych, odrzucono dane zarejestrowane podczas występowania opadów lub osadów atmosferycznych, zniwelowano wpływ odległości między czujnikami pomiarowymi, dokonano rotacji układu współrzędnych wiatru oraz wprowadzono poprawkę WPL (od nazwisk autorów Webb, Pearman, Leuning) [WEBB i in. 1980], wymaganą ze względu na zmiany gęstości powietrza w trakcie pomiarów.

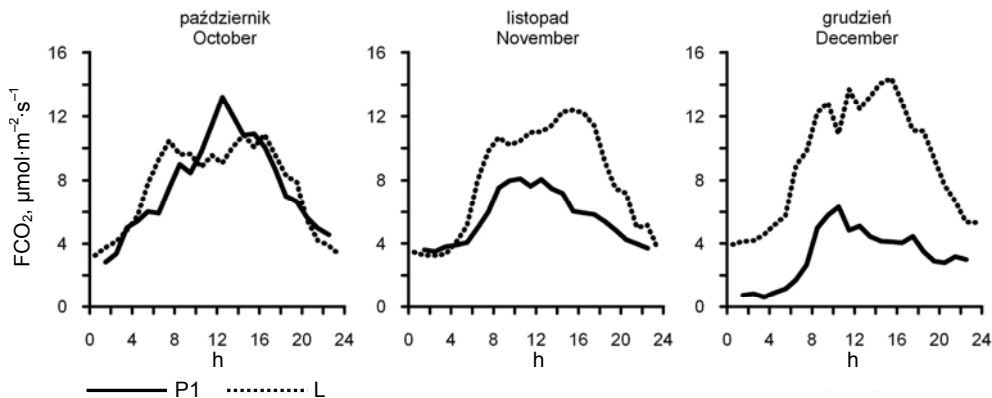


Rys. 2. Obszary źródeł turbulencyjnego strumienia dwutlenku węgla w punktach pomiarowych ocenione w warunkach stratyfikacji chwiejnej z prawdopodobieństwem $P = 25, 50, 75$ i 90% (czarne izolinie). Białe okręgi oznaczają odległości rzędu 250 i 500 metrów od punktów pomiarowych; oznaczenia wg rys. 1.; źródło map: Miejski Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Łodzi, wyniki własne

Fig. 2. Source areas of carbon dioxide turbulent flux calculated for unstable conditions with probability $P = 25, 50, 72$ and 90% (black lines). White circles indicate 250 m and 500 m distances from the measurement sites; explanations as in Fig. 1; source of maps: Municipal Centre of Geodesy and Cartographic Documentation of Łódź, own studies

WYNIKI I DYSKUSJA

Pomiary turbulencyjnego strumienia dwutlenku węgla netto na opisanych stanowiskach prowadzono w różnych, niepokrywających się ze sobą okresach (tab. 1). Wyniki pozyskane w latach 2002 i 2003 w punktach pomiarowych położonych poza centrum miasta zostały zatem porównane z uśrednionymi w odpowiednich miesiącach wartościami strumienia zmierzonego w centrum miasta w latach 2006–2011. Niezależnie od cech powierzchni czynnej średnie zmiany strumienia dwutlenku węgla charakteryzowały się wyraźnym rytmem dobowym (rys. 3, 4, 5). W nocy wartości F_{CO_2} sięgały $1-3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, z wyjątkiem strefy podmiejskiej, gdzie wartości były nieco wyższe w związku z uwalnianiem się dwutlenku węgla

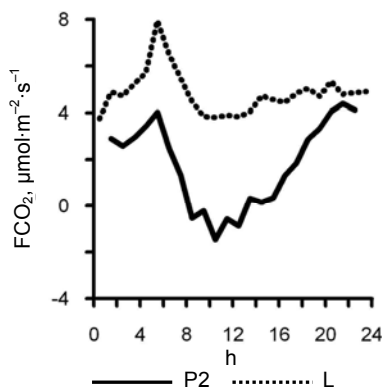


Rys. 3. Średnie dobowe zmiany strumienia dwutlenku węgla w okresie od października do grudnia w centrum Łodzi (L) oraz w dzielnicy przemysłowej (P1); źródło: wyniki własne

Fig. 3. Mean daily changes of carbon dioxide flux in the period October–December in the center of Łódź (L) and in postindustrial district (P1); source: own studies

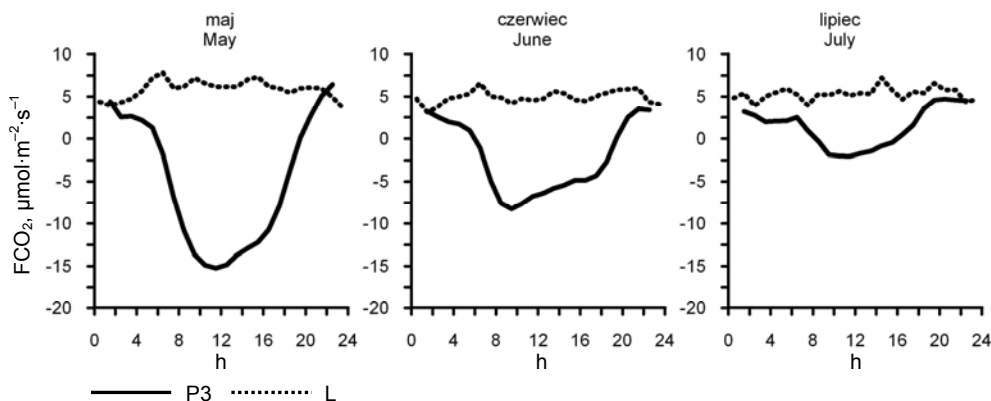
Rys. 4. Średnie dobowe zmiany strumienia dwutlenku węgla w sierpniu w centrum Łodzi (L) oraz w dzielnicy domów jednorodzinnych (P2); źródło: wyniki własne

Fig. 4. Mean daily changes of carbon dioxide flux in August in the center of Łódź (L) and in residential district (P2); source: own studies



podczas oddychania roślin. Najbardziej intensywna wymiana była obserwowana w dzień, przy czym w centrum miasta oraz dzielnicy przemysłowej obserwowano strumienie o charakterze dodatnim (przewaga emisji CO₂), podczas gdy w dzielnicy domów jednorodzinnych oraz w strefie podmiejskiej wymiana miała charakter ujemny (przewaga pochłaniania CO₂).

Odmiennej charakter powierzchni czynnej w otoczeniu punktów pomiarowych powoduje, że zarówno zmienność w ciągu doby, jak również natężenie wymiany dwutlenku węgla w dzielnicach położonych poza śródmieściem, różni się od wymiany tego gazu obserwowanego w centrum Łodzi. Otoczenie punktu pomiarowego L przy ulicy Lipowej emituje dwutlenek węgla przez cały rok [PAWLAK i in. 2011], co jest rezultatem niewielkiego udziału powierzchni pokrytych roślinnością, czyli braku czynnika w dostatecznym stopniu równoważącego emisję antropogenicznego CO₂, towarzyszącą spalaniu paliw kopalnych podczas ogrzewania miesz-



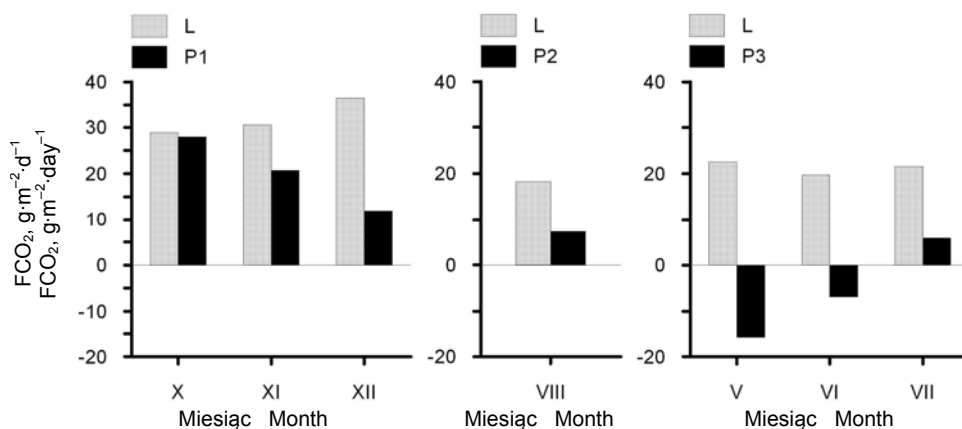
Rys. 5. Średnie dobowe zmiany strumienia dwutlenku węgla w okresie od maja do lipca w centrum Łodzi (L) oraz w strefie podmiejskiej (P3); źródło: wyniki własne

Fig. 5. Mean daily courses of carbon dioxide flux in the period May–July in the center of Łódź (L) and in a suburban area (P3); source: own studies

kań oraz w ruchu samochodowym. Strumień F_{CO_2} osiąga tu największe wartości w chłodnej porze roku (do $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ w ciągu dnia), podczas gdy w lecie jest on mniejszy i nie przekracza $10\text{--}20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [PAWLAK 2010; PAWLAK i in. 2011].

Zbliżone wartości zaobserwowano podczas październikowych pomiarów w dzielnicy przemysłowej (rys. 3). W kolejnych miesiącach wymiana dwutlenku węgla stawała się tam mniej intensywna, co jest rezultatem zmniejszania się temperatury powietrza. W otoczeniu punktu P1 dominują sklepy oraz hurtownie, a brak jest budynków mieszkalnych, dlatego można przypuszczać, że na dobową zmienność wymiany CO_2 ma wpływ również emisja związana z ruchem samochodowym. Dlatego właśnie w październiku maksymalny strumień F_{CO_2} w ciągu dnia pojawia się około południa, podczas gdy w centrum miasta są obserwowane dwa dobowe maksima związane z porannym i popołudniowym szczytem komunikacyjnym. W listopadzie i grudniu wymiana CO_2 w dzielnicy przemysłowej staje się mniejsza w porównaniu z centrum miasta, ze względu na mniejszą emisję CO_2 , towarzyszącą ogrzewaniu budynków użytkowych, które dominują w toczeniu punktu pomiarowego, a prawdopodobnie nie są ogrzewane w nocy. Relatywnie duży udział powierzchni pokrytych roślinnością, rzędu 60%, nie odgrywa dużej roli ze względu na chłodną porę, kiedy wymiana CO_2 związana z procesami biologicznymi ma niewielkie znaczenie. Dzielnica przemysłowa w badanym okresie stanowiła źródło dwutlenku węgla netto (rys. 6), którego dobowe natężenie sięgało od $28 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w październiku do $12 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w grudniu.

Istotny wpływ roślinności miejskiej na proces wymiany CO_2 zaobserwowano natomiast w sierpniu w otoczeniu punktu pomiarowego P2 na terenie dzielnicy domów jednorodzinnych (rys. 4) [OFFERLE 2003]. Niewielki odsetek powierzchni



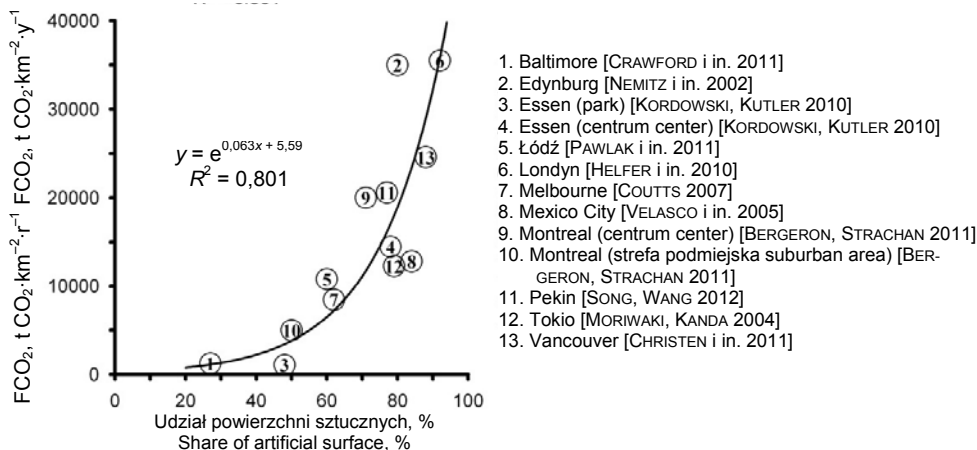
Rys. 6. Średnie dobowe strumienie dwutlenku węgla w centrum miasta (L), dzielnicy przemysłowej (P1), dzielnicy domów jednorodzinnych (P2) i strefie podmiejskiej (P3); źródło: wyniki własne

Fig. 6. Mean daily carbon dioxide flux in the center of Łódź (L), in postindustrial district (P1), in residential district (P2) and in suburban area (P3); source: own studies

sztucznych, rzędu 30%, spowodował, że pobór dwutlenku węgla przez rośliny w wyniku fotosyntezy w ciągu dnia zrównoważył niewielką o tej porze roku emisję antropogeniczną (brak ogrzewania domów, niewielkie natężenie ruchu samochodowego w tej części miasta), a strumień F_{CO_2} w godzinach południowych stał się ujemny. Wymiana dobową ma jednak charakter dodatni (rys. 6), co jest związane z uwalnianiem CO₂ w nocy podczas oddychania roślin. Podobną zmienność F_{CO_2} obserwuje się również w dzielnicach o luźnej, niskiej zabudowie innych miast [BERGERON, STRACHAN 2011; CRAWFORD i in. 2011].

Dominacja powierzchni roślinnych nad sztucznymi na terenie podmiejskim (punkt pomiarowy P3, rys. 5) spowodowała, że wymiana CO₂ ma tu zdecydowanie odmienny charakter niż w centrum miasta. Intensywne biologiczne pochłanianie CO₂ jest przyczyną wyraźnie ujemnego strumienia F_{CO_2} w ciągu dnia. W maju, kiedy roślinność w otoczeniu punktu pomiarowego (trawa) była najbardziej rozwinięta i zielona, wartość F_{CO_2} sięgała $-15 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Z czasem potencjał asymilacyjny trawy stawał się mniejszy, dlatego w czerwcu i lipcu tak intensywna wymiana nie była obserwowana. Strefa podmiejska w maju i czerwcu nie była źródłem CO₂ (rys. 6) – dobową wymianę miała charakter ujemny, rzędu -16 i $-7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Mniej intensywne pochłanianie CO₂ w lipcu w połączeniu z nocnym oddychaniem roślin spowodowało, że w tym czasie otoczenie punktu P3 stało się naturalnym źródłem tego gazu o natężeniu około $6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Zestawienie wyników pomiarów strumienia F_{CO_2} prowadzonych w kilkunastu miastach strefy umiarkowanej świadczy o wyraźnej zależności między roczną wymianą dwutlenku węgla a cechami powierzchni miejskiej w otoczeniu punktów pomiarowych (rys. 7).



Rys. 7. Roczny strumień dwutlenku węgla w zależności od udziału powierzchni sztucznych w okolicach punktów pomiarowych w różnych miastach strefy umiarkowanej;
źródło: opracowanie własne na podstawie danych z literatury

Fig. 7. Annual flux of carbon dioxide in relation to the share of artificial surface observed in several towns of temperate latitudes; source: own studies based on literature data

WNIOSKI

Opisane pomiary potwierdzają zależność między typem powierzchni czynnej w mieście a intensywnością i zwrotem turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla. Antropogeniczny strumień CO_2 w Łodzi jest na tyle silny, że tylko powierzchnie w znacznym stopniu pokryte roślinnością są w stanie go zrównoważyć podczas biologicznej wymiany. Z badań wynika, że jedynie w strefie podmiejskiej strumień był zdecydowanie ujemny, inne powierzchnie w badanych okresach stanowiły źródło netto dwutlenku węgla. Zaprezentowane wyniki mają jednak, z konieczności, charakter niepełny, ponieważ znaczne koszty sprzętu pomiarowego uniemożliwiły prowadzenie jednoczesnych pomiarów we wszystkich punktach pomiarowych oraz wymusiły ich ograniczenie do krótkich serii, przede wszystkim w ciepłej porze roku, kiedy antropogeniczna emisja CO_2 jest mniejsza. Znacznych dodatnich wartości strumienia F_{CO_2} należy się spodziewać w dzielnicy domów jednorodzinnych w sezonie grzewczym. Trudno też ocenić rolę roślinności w dzielnicy przemysłowej. Można przypuszczać, że odsetek powierzchni roślinnych rzędu 60% mógłby zrównoważyć emisję antropogenicznego CO_2 w ciepłej porze roku.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2014 jako projekt badawczy nr N N306 519638. Autorzy pragną wyrazić podziękowanie prof. S. Grimmond (Kings College, Londyn) za zgodę na wykorzystanie danych strumienia dwutlenku węgla z lat 2002–2003.

LITERATURA

- BERGERON O., STRACHAN I.B. 2011. CO₂ sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city. *Atmospheric Environment*. Vol. 45 s. 1564–1573.
- CHRISTEN A., COOPS N.C., CRAWFORD B.R., KELLET R., LISS K.N., OLCHOVSKI I., TOOKE T.R., VAN DER LAAN M., VOOGT J.A. 2011. Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements. *Atmospheric Environment*. Vol. 45 s. 6057–6069.
- COUTTS A.M., BERINGER J., TAPPER N.J. 2007. Characteristics influencing the variability of urban CO₂ fluxes in Melbourne, Australia. *Atmospheric Environment*. Vol. 41 s. 51–62.
- CRAWFORD B., GRIMMOND C.S.B., CHRISTEN A. 2011. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmospheric Environment*. Vol. 45 s. 896–905.
- FORTUNIAK K. 2003. Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Łódź. Wydaw. UŁ. ISBN 83-7171-658-3 ss. 233.
- FORTUNIAK K. 2009. Funkcja śladu i obszar źródłowy strumieni turbulencyjnych – podstawy teoretyczne i porównanie wybranych algorytmów na przykładzie Łodzi. *Prace Geograficzne IGiGP UJ. Z. 122 s. 9–22*.
- FORTUNIAK K. 2010. Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi. Łódź. Wydaw. UŁ. ISBN 978-83-7525-369-6 ss. 232.
- GRIMMOND C.S.B., OKE T.R. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 38 s. 1262–1292.
- GRIMMOND C.S.B., KING T.S., CROPLEY F.D., NOWAK D.J., SOUCH C. 2002. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*. Vol. 116 s. 243–254.
- HELPER C., FAMULARI D., PHILLIPS G.J., BARLOW J.F., WOOD C.R., GRIMMOND C.S.B., NEMITZ E. 2010. Controls of carbon dioxide concentrations and fluxes above central London. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*. Vol. 10 s. 23739–23780.
- KLYSIK K. 1998. Charakterystyka powierzchni miejskich w Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica*. T. 3 s. 173–185.
- KORDOWSKI K., KUTTLER W. 2010. Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*. Vol. 44 s. 2722–2730.
- LEE X., MASSMAN W., LAW B. 2004. *Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-2264-6 ss. 250.
- MATESE A., GIOLI B., VACCARI F.P., ZALDEI A., MIGLIETTA F. 2009. Carbon dioxide emission of the city center of Firenze, Italy: measurement, evaluation and source partitioning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol. 48 s. 1940–1947.
- MORIWAKI R., KANDA M. 2004. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and carbon dioxide over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 43 s. 1700–1710.
- NEMITZ E., HARGREAVES K.J., McDONALD A.G., DORSEY J.R., FOWLER D. 2002. Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale. *Environmental Science and Technology*. Vol. 36 s. 3139–3146.
- OFFERLE B. 2003. The energy balance of an urban area: Examining temporal and spatial variability through measurements, remote sensing and modelling. *Rozpr. dokt. Maszyn*. ss. 239.
- OFFERLE B., GRIMMOND C.S.B., FORTUNIAK K., PAWLAK W. 2006. Intra-urban differences of surface energy fluxes in a central European city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol. 45 s. 125–136.
- PAWLAK W. 2010. Extreme values of turbulent carbon dioxide net flux in the center of Łódź against the background of meteorological conditions. W: *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany*

- i ich konsekwencje. Pr. zbior. Red. E. Bednorz, L. Kolendowicz. Poznań. Bogucki Wydaw. Nauk. s. 163–175.
- PAWLAK W., FORTUNIAK K., OFFERLE B., GRIMMOND CSB. 2007. Zastosowanie metody korelacyjnej do pomiarów strumieni CO_2 i H_2O z powierzchni trawiastej. *Przegląd Geofizyczny*. T. 52 s. 95–106.
- PAWLAK W., FORTUNIAK K., 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*. Vol. 31 s. 232–243.
- SCHMID H.P. 1994. Source areas for scalar and scalar fluxes. *Boundary Layer Meteorology*. Vol. 67 s. 293–318.
- SONG T., WANG Y. 2012 Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing. *Atmospheric Research*. Vol. 106 s. 139–149.
- VELASCO E., ROTH M. 2010. Cities as net sources of CO_2 : Review of atmospheric CO_2 exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography Compass*. Vol. 4 s. 1238–1259.
- VELASCO E., PRESSLEY S., ALLWINE E., WESTBERG H., LAMB B. 2005. Measurements of CO_2 fluxes from the Mexico City urban landscape. *Atmospheric Environment*. Vol. 39 s. 7433–7446.
- VESALA T., JÄRVI L., LAUNIAINEN S., SOGACHEV A., RANNIK Ü., MAMMARELLA I., SIIVOLA E., KERONEN P., RINNE J., RIIKONEN A., NIKINMAA E. 2008. Surface-atmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland. *Tellus*. Vol. 60B s. 188–199.
- VOGT R., CHRISTEN A., ROTACH M.W., ROTH M., SATYANARAYANA A.N.V. 2006. Temporal dynamics of CO_2 fluxes and profiles over a Central European city. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol. 84 s. 117–126.
- WEBB E.K., PEARMAN G.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*. Vol. 106 s. 85–100.

Włodzimierz PAWLAK, Mariusz SIEDLECKI

THE TYPE OF URBAN SURFACE AND TURBULENT CARBON DIOXIDE EXCHANGE (ŁÓDŹ CASE STUDY)

Key words: *eddy covariance method, turbulent flux of carbon dioxide, urban area*

S u m m a r y

The aim of this work was to compare turbulent exchange intensity of carbon dioxide in urban areas of different type of building development. Measurements were carried out within the densely built-up city centre, residential and postindustrial districts and in a suburban area. Results confirmed strong relationship between the density and type of building development, percent plant cover and the intensity and direction of carbon dioxide exchange. Most intensive positive (to the atmosphere) carbon dioxide exchange was observed in the centre of Łódź, and a little bit less in a postindustrial area. In residential district, where plant cover was quite large, anthropogenic carbon dioxide emission was compensated by natural uptake of this gas by plants. In a suburban area the exchange was strongly negative (to the active surface) because of the domination of vegetated surfaces and a small amount of anthropogenic carbon dioxide emission.