

# ANTROPOGENICZNE I BIOGENICZNE SKŁADOWE STRUMIENIA DWUTLENKU WĘGLA W ŁODZI

## Anthropogenic and biogenic components of carbon dioxide flux in Łódź

WŁODZIMIERZ PAWLAK<sup>1</sup> , MARIUSZ SIEDLECKI<sup>1</sup> , KRZYSZTOF FORTUNIAK<sup>1</sup> 

**Zarys treści.** Metoda kowariancji wirów pozwala na określenie dobowej, sezonowej i rocznej pionowej wymiany dwutlenku węgla pomiędzy powierzchnią miejską a atmosferą. Jednakże pomiary te nie zawierają informacji o tym jakie procesy wpływają na intensywność i kierunek tej wymiany. W przypadku obszarów zurbanizowanych o intensywności wymiany CO<sub>2</sub> decydują zarówno procesy biogeniczne (jako efekt obecności roślinności miejskiej), jak i procesy związane z działalnością człowieka (np. oddychanie ludzi i spalanie paliw kopalnych). Celem opracowania jest prezentacja wstępnych wyników wyznaczania bio- i antropogenicznych składowych wymiany CO<sub>2</sub> w Łodzi. W tym celu zastosowano statystyczne podejście zaproponowane przez Menzera i McFaddena dla miast amerykańskich (Menzer, McFadden 2017). Do analizy wykorzystano dane z lat 2012–2015 ze stanowiska pomiarowego przy ul. Lipowej 81 położonego w zachodniej części centrum Łodzi. Wyniki wskazują, że wszystkie antropogeniczne składowe strumienia CO<sub>2</sub> netto wyznaczone dla wybranego fragmentu centrum Łodzi mają wartości dodatnie, zatem wskazują na emisję tego gazu do atmosfery. Najistotniejszą składową strumienia CO<sub>2</sub> netto w Łodzi jest, niezależnie od pory roku, strumień związany ze spalaniem paliw kopalnych w silnikach samochodów. W chłodnej połowie roku istotną rolę pełni również strumień związany z ogrzewaniem mieszkań.

**Słowa kluczowe:** miasto, turbulencyjna wymiana dwutlenku węgla, strumień antropogeniczny, strumień biogeniczny, podział strumienia netto

**Abstract.** The eddy covariance method allows the determination of the daily, seasonal and annual vertical carbon dioxide exchange between the urban surface and the atmosphere. However, these measurements do not contain information about what processes influence the intensity and direction of this exchange. In the case of urbanized areas, the intensity of CO<sub>2</sub> exchange is determined by both biogenic processes (as a result of the presence of urban vegetation) and processes related to human activity (e.g. human respiration and combustion of fossil fuels). The aim of this paper is to present preliminary results of determining bio- and anthropogenic components of CO<sub>2</sub> exchange in Łódź. For this purpose, the statistical approach proposed by Menzer and McFadden for American cities was applied (Menzer, McFadden 2017). The analysis used data from 2012–2015 from the measurement site at 81 Lipowa St., located in the western part of the centre of Łódź. The results indicate that all anthropogenic components of the net CO<sub>2</sub> flux determined for the selected part of the centre of Łódź have positive values, so they indicate emissions of this gas into the atmosphere. The most significant component of the net CO<sub>2</sub> flux in Łódź is, regardless of the season, the flux associated with the combustion of fossil fuels in car engines. In the cold half of the year, the flux associated with residential heating also plays an important role.

**Key words:** city, turbulent exchange of carbon dioxide, anthropogenic flux, biogenic flux, net flux partitioning

## Wstęp

Miasta, pomimo że ich powierzchnia zajmuje znikomy odsetek powierzchni lądów, mają bardzo duży udział w globalnej emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych (IPCC 2023). Obszary zurbanizowane, a zwłaszcza centra miast zdominowane przez powierzchnie sztuczne,

w ograniczonym stopniu wykazują możliwość poboru dwutlenku węgla z atmosfery. Ich cechą charakterystyczną jest za to mnogość procesów, których podstawą jest spalanie paliw kopalnych, prowadzących do uwalniania znacznych ilości CO<sub>2</sub> (Aubinet i in. 2012; Christen 2014; Schmutz i in. 2016; Oke i in. 2017). Szacowanie pionowej turbulencyjnej wymiany gazów cieplarnianych (przede wszystkim dwutlenku węgla, ale również

<sup>1</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Klimatologii i Hydrologii, Zakład Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: wlodzimierz.pawlak@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-9785-4787; e-mail: mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-5804-8985; e-mail: krzysztof.fortuniak@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0001-7043-8751

metanu, podtlenku azotu i innych) pomiędzy miastami a atmosferą pozostaje w sferze zainteresowań klimatologów od wielu lat (Foken 2008; Aubinet i in. 2012; Nicolini i in. 2013; Oke i in. 2017). Pomiary tejże wymiany prowadzone są w miastach od około 20–30 lat, jednak ich skalę, w porównaniu do ekosystemów zdominowanych przez roślinność, należy ocenić jako zdecydowanie niewystarczającą. Długoterminowe (dłuższe niż rok), regularne pomiary strumieni dwutlenku węgla (FCO<sub>2</sub>) przeprowadzono jak w dotąd w około 40 miastach świata (Christen, Vogt 2004; Pawlak i in. 2011; Gioli i in. 2012; Kotthaus, Grimmond 2014ab; Ao i in. 2016; Helfter i in. 2016; Ueyama, Ando 2016; Weissert i in. 2016; Oke i in. 2017; Roth i in. 2017; Järvi i in. 2018; Kleingeld i in. 2018; Stagakis i in. 2019; Takano, Ueyama 2021; Matthews, Schume 2022). Tak mała liczba stanowisk pomiarowych, w porównaniu do kilkuset na terenach naturalnych bądź rolniczych, wynika z problemów metodycznych i logistycznych podczas prowadzenia pomiarów w miastach (Aubinet i in. 2012; Christen 2014; Oke i in. 2017). Mimo to udało się między innymi wyznaczyć zmienność dobową, sezonową czy roczną FCO<sub>2</sub> oraz wykryć zależność między rocznym strumieniem CO<sub>2</sub> a odsetkiem powierzchni sztucznych w okolicach stanowiska pomiarowego (Nordbo i in. 2012; Oke i in. 2017). Ponieważ pionowy strumień jest sumą różnego rodzaju procesów kształtujących wymianę badanego gazu między podłożem a atmosferą, szczególną uwagę poświęca się również zagadnieniu wydzielenia składowych strumienia netto (ang. *flux partitioning*) (Buckley i in. 2016; Schmutz i in. 2016; Weissert i in. 2016; Menzer, McFadden 2017; Järvi i in. 2018; Sagent i in. 2018).

W ciągu ostatnich 20–30 lat wypracowano szereg technik pomiarowych umożliwiających pomiar pionowych strumieni dwutlenku węgla oraz innych gazów cieplarnianych (Lee i in. 2004; Foken 2008; Aubinet i in. 2012; Oke i in. 2017; Burba 2021). Do najczęściej stosowanych należą dziś metoda komorowa oraz metoda kowariancji wirów. Pierwsza z nich, stosowana głównie w ekosystemach pokrytych niezbyt wysoką roślinnością, umożliwia zarówno wyznaczenie strumienia CO<sub>2</sub> netto, jak również jego podział na składowe determinowane przez fotosyntezę oraz oddychanie roślin. Niestety jedną z jej wad jest brak możliwości zastosowania dla dużych, zróżnicowanych geometrycznie powierzchni zurbanizowanych, dlatego w miastach stosuje się głównie metodę kowariancji wirów. Metoda ta, uznawana za najlepszą do realizacji długoterminowych, regu-

larnych pomiarów strumieni dwutlenku węgla, cechuje się wysoką dokładnością (Fortuniak 2003, 2010; Lee i in. 2004; Foken 2008; Aubinet i in. 2012; Oke i in. 2017; Burba 2021). Umożliwia szacowanie strumieni gazów cieplarnianych ze stałym krokiem czasowym (np. 1 godzina), ale wynik ma charakter netto, czyli jest wypadkową oddziaływania wszystkich procesów obserwowanych w tzw. obszarze źródłowym w okolicy stanowiska pomiarowego. W przeciwieństwie do obszarów pokrytych roślinnością, gdzie o strumieniu CO<sub>2</sub> netto decydują procesy biogeniczne (przede wszystkim fotosynteza i oddychanie), w miastach, a zwłaszcza w ich centrach, zwrot i intensywność wymiany CO<sub>2</sub> w przeważającej mierze determinują emisje antropogeniczne będące efektem spalania paliw kopalnych (Aubinet i in. 2012; Christen 2014; Oke i in. 2017).

Ilościowe określenie intensywności antropogenicznych emisji jest niestety bardzo trudne ze względu na ogromne zróżnicowanie procesów, którym towarzyszy spalanie węgla, benzyny czy gazu ziemnego. Można stwierdzić, że sumarycznie największe emisje są związane z ruchem samochodowym, ogrzewaniem mieszkań, gotowaniem i podgrzewaniem wody. Nie należy również pomijać istotnego źródła CO<sub>2</sub>, jakim jest oddychanie ludzi (Moriwaki, Kanda 2004; Ward i in. 2013). Badania nad antropogenicznymi składowymi strumienia CO<sub>2</sub> w miastach dodatkowo utrudnia fakt, że ich bezpośredni pomiar jest niemożliwy. Najczęściej stosowane obecnie metody rozkładu FCO<sub>2</sub> netto na składowe oparte są o pomiary izotopowe dwutlenku węgla w powietrzu, pomiary komorowe na wybranych powierzchniach w kombinacji z metodami inwentaryzacyjnymi lub rozwiązania statystyczne (Jasek i in. 2014; Ao i in. 2016; Chamberlain i in. 2016; Schmutz i in. 2016; Weissert i in. 2016; Menzer, McFadden 2017; Roth i in. 2017; Björkegren, Grimmon 2018; Järvi i in. 2018; Sargent i in. 2018; Goret i in. 2019; Stagakis i in. 2019; Jasek-Kamińska i in. 2020; Bezyk i in. 2021, 2023; Duan i in. 2022; Matthews, Schume 2022).

Celem niniejszego opracowania jest próba wydzielenia składowych strumienia CO<sub>2</sub> netto w centrum Łodzi. W tym celu zastosowano rozwiązanie statystyczne, które Menzer i McFadden (2017) zaproponowali dla miast amerykańskich. W opracowaniu wykorzystano dane FCO<sub>2</sub> zarejestrowane w latach 2012–2015 na stanowisku pomiarowym przy ul. Lipowej 81, dane o ruchu samochodowym pozyskane z Urzędu Miasta Łodzi oraz dane gęstości zaludnienia w centrum miasta (Statystyka Łodzi 2012, 2014, 2016). Zastosowa-

nie wymienionej metody umożliwiło podział strumienia CO<sub>2</sub> netto w centrum Łodzi na składową biogeniczną oraz antropogeniczną, z której następnie wydzielono składowe związane z oddychaniem mieszkańców oraz spalaniem paliw kopalnych w silnikach samochodów, podczas ogrzewania mieszkań oraz podgrzewania wody i gotowania.

## Stanowisko pomiarowe

Pod względem liczby ludności (ok. 660 tysięcy w 2023 roku) Łódź jest czwartym miastem w Polsce, a jego powierzchnię szacuje się na blisko 300 km<sup>2</sup>. W okresie, dla którego przeprowadzono analizy liczba ludności była nieco większa i sięgała 700 tysięcy mieszkańców. Gęstość zaludnienia w Łodzi w 2015 roku zmieniała się od 1490/km<sup>2</sup> w dzielnicy Widzew do 9420/km<sup>2</sup> w Śródmieściu (Statystyka Łodzi 2016). Miasto położone jest na względnie płaskim terenie nachylnym ku południowemu zachodowi z wysoko-

ściami bezwzględnie zmieniającymi się od 280 m n.p.m. do 160 m n.p.m. Cechą charakterystyczną Łodzi jest jej specyficzne otoczenie. W sąsiedztwie miasta brak jest przeszkód orograficznych oraz dużych zbiorników wodnych. Łódź jest również jedynym miastem w Polsce, przez które nie przepływa duża rzeka. Cechy te umożliwiają wnikliwe badania jego lokalnego klimatu, który jest odzwierciedleniem oddziaływania terenu zurbanizowanego na warstwę graniczną nad miastem z zaburzeniami zewnętrznymi ograniczonymi do minimum (Fortuniak 2003, 2010; Offerle i in. 2006ab; Pawlak i in. 2011, 2016; Pawlak, Fortuniak 2016). Prowadzenie badań nad klimatem Łodzi, jak również nad wymianą masy, energii i pędu ułatwia specyficzna morfologia miasta. Jego centrum zajmujące powierzchnię około 80 km<sup>2</sup> jest zabudowane w przeważającej mierze budynkami o podobnej wysokości, a niewielka liczba budynków kilkakrotnie przewyższających średnią zabudowę nie zaburza przepływu powietrza (Fortuniak 2003, 2010; Zieliński i in. 2013).



Rys. 1. Obszar źródłowy strumieni turbulencyjnych FCO<sub>2</sub> w warunkach równowagi chwiejnej strumieni wyznaczone metodą Schmid (1997) z prawdopodobieństwem P = 25, 50, 75 i 90% (linie ciągłe)  
Linie przerywane oznaczają odległość 250, 500, 750 i 1000 m od stanowiska pomiarowego  
(Google Earth 2024)

Source area of FCO<sub>2</sub> turbulent fluxes under unstable conditions determined with the Schmid (1997) method with probabilities P = 25, 50, 75 and 90% (solid lines)  
Dashed lines indicate the distance of 250, 500, 750 and 1000 m from the measuring station

Wykorzystane w opracowaniu pomiary przeprowadzono na stanowisku przy ul. Lipowej 81 (51°45'45''N, 19°26'43''E; 203 m n.p.m.) w zachodniej części centrum Łodzi (rys. 1). Zestaw przyrządów pomiarowych zainstalowano na maszcie na jednym z byłych budynków Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego. Otoczenie stanowiska pomiarowego to w przeważającej mierze (ok. 62%) powierzchnie sztuczne, ulice, chodniki, budynki itp. Zabudowa to przede wszystkim 3–5-piętrowe XX-wieczne kamienice o średniej wysokości 15–20 m z płaskimi, najczęściej pokrytymi czarną papą dachami (Kłysik 1998; Fortuniak 2003; Offerle i in 2006ab). Pozostałe 38% to raczej rozproszone niż zwarte powierzchnie pokryte trawą lub obsadzone drzewami, głównie wzdłuż ulic. Drzewa są przeważnie liściaste, o wysokości rzadko przekraczającej okoliczne budynki, dlatego można stwierdzić, że w otoczeniu punktu pomiarowego przy ul. Lipowej 81 zabudowa charakteryzuje się dobrze wykształconą warstwą dachową o wysokości 11 m (Fortuniak 2010; Fortuniak i in 2013; Fortuniak, Pawlak 2015). Biorąc pod uwagę, że zestaw pomiarowy umieszczono na wysokości 37 m nad podłożem, można stwierdzić, że zgodnie z teoretycznymi podstawami pomiaru pionowych strumieni turbulencyjnych strumieni  $FCO_2$  mierzono w warstwie stałych strumieni, powyżej warstwy tarcia (Grimmond, Oke 1999; Offerle i in 2006ab; Fortuniak 2010).

Dla zmierzonych w latach 2012–2015 strumieni turbulencyjnych  $CO_2$  wyznaczono również obszar źródłowy (rys. 1). W tym celu zastosowano metodę zaproponowaną przez Schmidą (Schmid, 1997). Analizę przeprowadzono na podstawie wszystkich dostępnych danych, jakie zarejestrowano w godzinach 10:00–14:00 UTC+1 w warunkach stratyfikacji chwiejnej, a wyniki wykazały, że w badanym okresie obszar źródłowy średnio sięgał, w zależności od kierunku wiatru, od 250 m do 750 m od stanowiska pomiarowego (rys. 1). Ponadto w opracowaniu wykorzystano dane o ruchu samochodowym zarejestrowanym z krokiem czasowym 30 minut za pomocą pętli indukcyjnych na skrzyżowaniu ulic Kopernika i Kilińskiego, położonego w odległości około 150 m na południowy wschód od stanowiska.

## Instrumenty pomiarowe i metodyka

Pomiary pionowych strumieni masy wymagają specyficznego zestawu przyrządów pomiarowych. Podczas pomiarów  $FCO_2$  w Ło-

dzi wykorzystano anemometr ultradźwiękowy 3D RMYoung 81000 (RMYoung, USA) oraz czujnik koncentracji  $CO_2/H_2O$  LI7500 (Licor Biosciences, USA). Przyrządy rejestrowały fluktuacje, odpowiednio, pionowej składowej prędkości wiatru oraz koncentracji  $CO_2$  w powietrzu z częstotliwością 10 Hz. Głowice przyrządów zainstalowano około 1 m poniżej szczytu masztu, w odległości około 20 cm od siebie i 60 cm od masztu (Pawlak i in. 2011; Pawlak, Fortuniak 2016). W trakcie okresu pomiarowego (w lipcu 2013) czujnik LI7500 został poddany kalibracji. Ponadto elementy aktywne obu przyrządów (nadajniki i odbiorniki ultradźwięków, lustra) były regularnie czyszczone w celu wyeliminowania negatywnego wpływu zanieczyszczeń miejskich oraz produktów kondensacji na jakość pomiarów. Oprócz parametrów koniecznych do wyliczenia strumieni dwutlenku węgla mierzono również co 10 minut podstawowe elementy meteorologiczne, takie jak: temperatura i wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne, bilans promieniowania i jego składowe, opad czy kierunek i prędkość wiatru. Wszystkie zmienne zapisywane były za pomocą rejestratorów CR10X i CR21 (Campbell Scientific, USA).

Do wyznaczenia strumieni  $CO_2$  w centrum Łodzi zastosowano metodę kowariancji wirów (ang. *eddy covariance*). Metoda ta umożliwia prowadzenie dokładnych, ciągłych, długoterminowych pomiarów pionowych turbulencyjnych strumieni masy ze stałym krokiem czasowym (w tym przypadku 1 godzina) (Lee i in. 2004; Foken 2008; Fortuniak 2010; Aubinet i in. 2012; Oke i in. 2017). Zgodnie z podstawami teoretycznymi metody strumień  $FCO_2$  wyznaczany jest wprost z definicji jako kowariancja fluktuacji pionowej składowej prędkości wiatru  $w$  oraz koncentracji  $CO_2$  w powietrzu  $\rho CO_2$ :

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

Obliczenia zrealizowano z krokiem czasowym 1 godzina oraz zastosowano uśrednianie blokowe. Strumień dodatni oznacza uwalnianie dwutlenku węgla do atmosfery, a ujemny – jego pobór przez obszar zurbanizowany. Powyższe obliczenia mają charakter wstępny, zgodnie z założeniami metody kowariancji wirów wykonano tak zwany *post-processing*, czyli przeprowadzono konieczne procedury oraz wyznaczono wymagane poprawki. Odrzucono zatem dane o nierealnych wartościach, przeprowadzono procedurę *spike detection*, maksymalizację kowariancji w przedzia-



le  $\pm 2$  sekundy ze względu na separację instrumentów pomiarowych, dokonano podwójnego obrotu układu współrzędnych wiatru, skorygowano temperaturę mierzoną przez anemometr ultradźwiękowy ze względu na wilgotność powietrza, dodano poprawkę Webb-Pearman-Leuning ze względu na zmiany gęstości powietrza oraz na straty spektralne (Lee i in. 2004; Foken 2008; Fortuniak 2010; Aubinet i in. 2012; Oke i in. 2017). W ostatnim etapie przeprowadzono ewaluację jakości danych, zakładającą szczegółową analizę stacjonarności danych za pomocą trzech różnych testów (Fortuniak 2010). Za prawidłowe uznawano dane zaakceptowane przez co najmniej jeden test.

Zastosowanie metody kowariancji wirów pozwoliło na uzyskanie prawie czteroletniego (od 1 stycznia 2012 roku do 24 września 2015 roku) szeregu 1-godzinnych wartości  $FCO_2$  (rys. 3). Tak wyznaczone strumienie mają po pierwsze, wartości uśrednione dla aktualnego obszaru źródłowego (odzwierciedlają strumień z dużej powierzchni miejskiej, a nie pojedynczych źródeł  $CO_2$  dla atmosfery) oraz po drugie, charakter netto ukazujący, w jakim stopniu w kolejnych godzinach uwalnianie  $CO_2$  do atmosfery przeważało na jego poborem przez podłoże (Pawlak i in. 2011). Szeregi czasowe  $FCO_2$  wyznaczone za pomocą metody kowariancji wirów dają w konsekwencji możliwość szczegółowej analizy zmienności  $FCO_2$  w różnych skalach czasowych (rys. 3–4), ale z założenia wykluczają możliwość analizy składowych strumienia netto. Tymczasem w centrum Łodzi, podobnie jak w innych miastach, strumień  $CO_2$  netto determinują zarówno strumienie antropogeniczne  $FCO_{2(A)}$  oraz, mimo relatywnie niskiego udziału powierzchni pokrytych roślinnością, strumienie biogeniczne  $FCO_{2(B)}$ :

$$FCO_2 = FCO_{2(A)} + FCO_{2(B)} \quad (2)$$

Wyodrębnienie powyższych składowych przeprowadzono zgodnie ze statystyczną metodą, jaką zastosowali Menzer i McFadden (2017) w amerykańskim Saint Paul (Minnesota, USA). Strumień biogeniczny jest algebraiczną sumą oddychania  $R_{eco}$  oraz będącej rezultatem fotosyntezy produkcji pierwotnej brutto GPP (ang. *gross primary production*) (Aubinet i in. 2012):

$$FCO_{2(B)} = R_{eco} + GPP \quad (3)$$

W przypadku  $FCO_{2(A)}$  autorzy metody zakładają, że wymianę o charakterze antropogenicznym determinują cztery główne składowe:

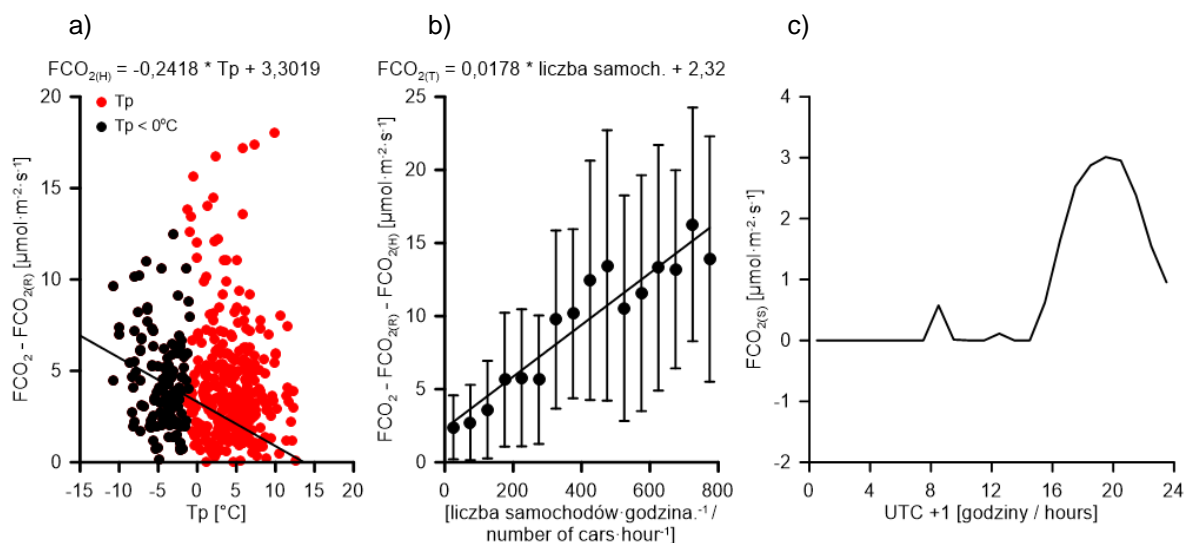
$$FCO_{2(A)} = FCO_{2(H)} + FCO_{2(T)} + FCO_{2(S)} + FCO_{2(R)} \quad (4)$$

odzwierciedlające uwalnianie dwutlenku węgla do atmosfery w wyniku spalania paliw kopalnych podczas ogrzewania mieszkań  $FCO_{2(H)}$ , w ruchu samochodowym  $FCO_{2(T)}$ , podczas podgrzewania wody i gotowania  $FCO_{2(S)}$  oraz podczas oddychania ludzi  $FCO_{2(R)}$ . Metoda zakłada szacowanie kolejnych składowych i odejmowanie ich od wyjściowego szeregu  $FCO_2$  netto. Po odjęciu wszystkich czterech powyższych składowych powstaje końcowy szereg składowej biogenicznej  $FCO_{2(B)}$ . Metoda zakłada więc obliczenia w pięciu krokach.

W pierwszym kroku, zgodnie z literaturą (Moriwaki, Kanda 2004; Ward i in. 2013) przyjęto, że oddychanie jednego mieszkańca Łodzi zmienia się w ciągu doby i wynosi  $280 \mu\text{mol } CO_2 \cdot s^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$  (w ciągu dnia),  $120 \mu\text{mol } CO_2 \cdot s^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$  (w trakcie nocy) oraz  $200 \mu\text{mol } CO_2 \cdot s^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$  w ciągu godzin przejściowych, zdefiniowanych jako godzinę przed i po wschodzie i zachodzie słońca. Po uwzględnieniu gęstości zaludnienia w badanej części Łodzi (Statystyka Łodzi 2012, 2014, 2016) okazało się, że wielkość  $FCO_{2(R)}$  waha się w zakresie od 1,16 do 2,72  $\mu\text{mol} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ . Zgodnie z powyższymi danymi stworzono szereg  $FCO_{2(R)}$  z krokiem 1-godzinnym dla całego okresu badawczego oraz odjęto go od szeregu  $FCO_2$  netto.

Krok drugi zakłada wyodrębnienie składowej związanej z emisją  $CO_2$  podczas ogrzewania mieszkań. Emisja ta silnie zależy od temperatury powietrza, należy zatem znaleźć korelację między szeregiem  $FCO_2 - FCO_{2(R)}$  a temperaturą powietrza  $T_p$ , ale tylko dla danych zarejestrowanych przy temperaturze powietrza niższej od  $-1^\circ C$  oraz w godzinach nocnych, kiedy ruch samochodowy jest minimalny (rys. 2a). W ten sposób wyeliminowany zostaje wpływ spalania w ruchu samochodowym oraz aktywności biologicznej roślinności miejskiej. Zgodnie z otrzymanym równaniem  $FCO_{2(H)} = -0,2418 \cdot T_p + 3,3019$  stworzono szereg  $FCO_{2(H)}$  dla całego okresu badawczego z krokiem 1-godzinnym i odjęto go do szeregu uzyskanego w kroku pierwszym.

Krok trzeci pozwala na oszacowanie składowej  $FCO_{2(T)}$  antropogenicznego strumienia  $CO_2$  związanej ze spalaniem paliw kopalnych w silnikach samochodowych. W tym celu wykorzystano dane o liczbie samochodów przejeżdżających przez skrzyżowanie ulic Kilińskiego i Kopernika w postaci sum godzinnych. Zgodnie z założeniami metody oszacowano korelację między wartościami  $FCO_2 - FCO_{2(R)} - FCO_{2(H)}$  uśrednionymi dla



Rys. 2. a – Zależność między temperaturą powietrza a  $FCO_{2(H)}$  obserwowanymi w zimie, w nocy przy temperaturze powietrza  $T_p < -1^{\circ}C$   
 b – Zależność między natężeniem ruchu samochodowego a strumieniami  $CO_2$ , pionowe linie oznaczają  $\pm$  odchylnie standardowe  
 c – Średni dobowy przebieg zmienności strumieni  $CO_2$  będących efektem spalania paliw kopalnych podczas podgrzewania wody i gotowania  
 Dodatkowe objaśnienia w tekście

a – Relationship between air temperature and  $FCO_2$  fluxes observed in winter, at nights with air temperature  $T_p$  below  $-1^{\circ}C$   
 b – Relationship between car traffic and  $CO_2$  fluxes, vertical lines indicate  $\pm$  standard deviation  
 c – Mean diurnal variability of  $CO_2$  fluxes resulting from the combustion of fossil fuels during water heating and cooking  
 Additional explanations in the text

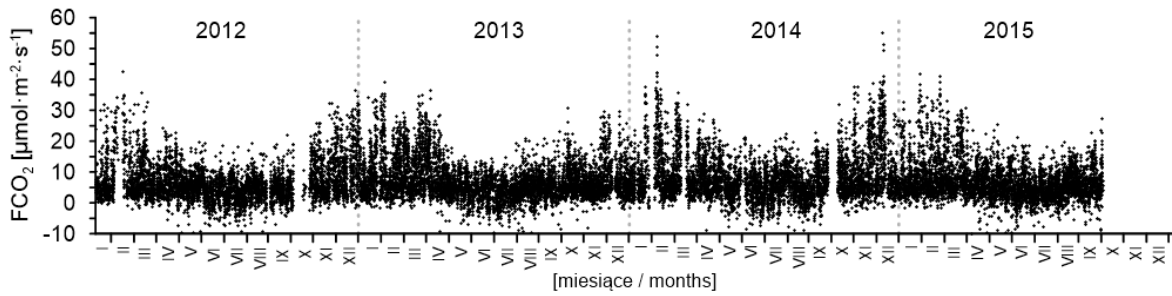
przedziałów liczebności przejeżdżających w ciągu samochodów (od 0 samochodów do 800 samochodów w przedziałach co 50 samochodów) (rys. 2b). Aby wyeliminować z wyznaczonej zależności wpływ biologicznej działalności roślin na wymianę dwutlenku węgla, korelację oszacowano wyłącznie dla danych zarejestrowanych przy temperaturze niższej niż  $-1^{\circ}C$ . Równanie  $FCO_{2(T)} = 0,0178 \cdot \text{liczba samochodów} + 2,32$  pozwoliło na stworzenie szeregu  $FCO_{2(T)}$  dla całego okresu badawczego z krokiem 1-godzinnym, który następnie odjęto od szeregu uzyskanego w kroku drugim.

Szacowanie zmienności  $FCO_{2(S)}$  odpowiedzianego za emisję podczas codziennych aktywności mieszkańców centrum Łodzi, takich jak podgrzewanie wody i gotowanie, to krok czwarty metody, zgodnie z którym z szeregu  $FCO_2 - FCO_{2(R)} - FCO_{2(H)} - FCO_{2(T)}$  należy wyliczyć średni przebieg dobowy (rys. 2c). Tak uzyskana zmienność dobowa sugeruje, że podgrzewanie wody i gotowanie to aktywność głównie popołudniowa i wieczorna. Autorzy przyjmują, że powyższe aktywności nie zmieniają się w ciągu ro-

ku, zatem z uzyskanych wartości  $FCO_{2(S)}$  stworzono szereg 1-godzinny dla całego okresu i odjęto go od szeregu otrzymanego w kroku trzecim. Zgodnie z założeniami metody otrzymane wartości stanowią „resztę”, czyli biogeniczną część  $FCO_2$  netto, co stanowi krok piąty, ostatni proponowanej metody. Należy podkreślić, że w przypadku niniejszego opracowania zrezygnowano z obliczania składowych  $FCO_{2(B)}$ , czyli  $R_{eco}$  oraz GPP (równanie 3).

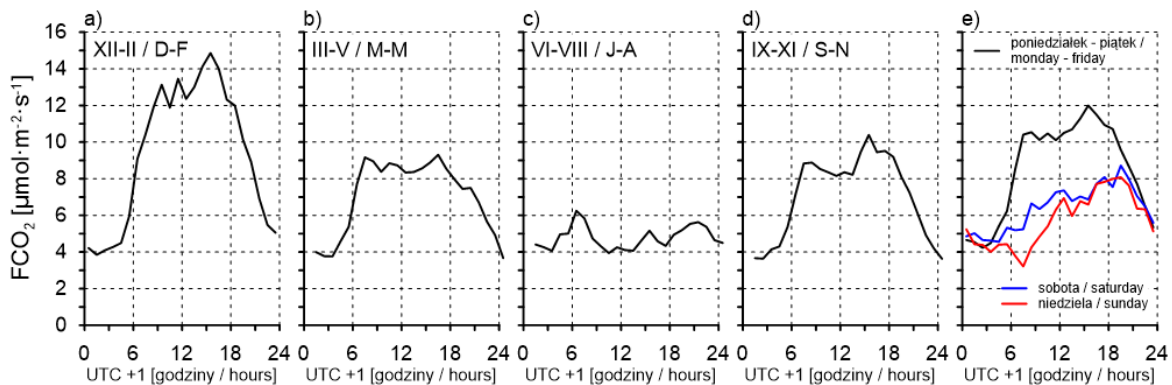
## Wyniki

Zmienność strumienia  $CO_2$  netto zarejestrowanego w centrum Łodzi w latach 2012–2015 (rys. 3) wykazuje typowe cechy znane z centrów innych miast umiarkowanych szerokości geograficznych (Christen, Vogt 2004; Pawlak i in. 2011; Kotthaus, Grimmond 2014ab; Ao i in. 2016; Gioli i in. 2016; Helfter i in. 2016; Ueyama, Ando 2016; Weissert i in. 2016; Oke i in. 2017; Roth i in. 2017; Järvi i in. 2018; Kleingeld i in. 2018; Stagakis i in. 2019; Takano, Ueyama 2021; Matthews, Schume



Rys. 3. Zmienność godzinnych strumieni FCO<sub>2</sub> w centrum Łodzi w latach 2012–2015

Variability of 1-hour FCO<sub>2</sub> fluxes in the centre of Łódź in the period 2012–2015



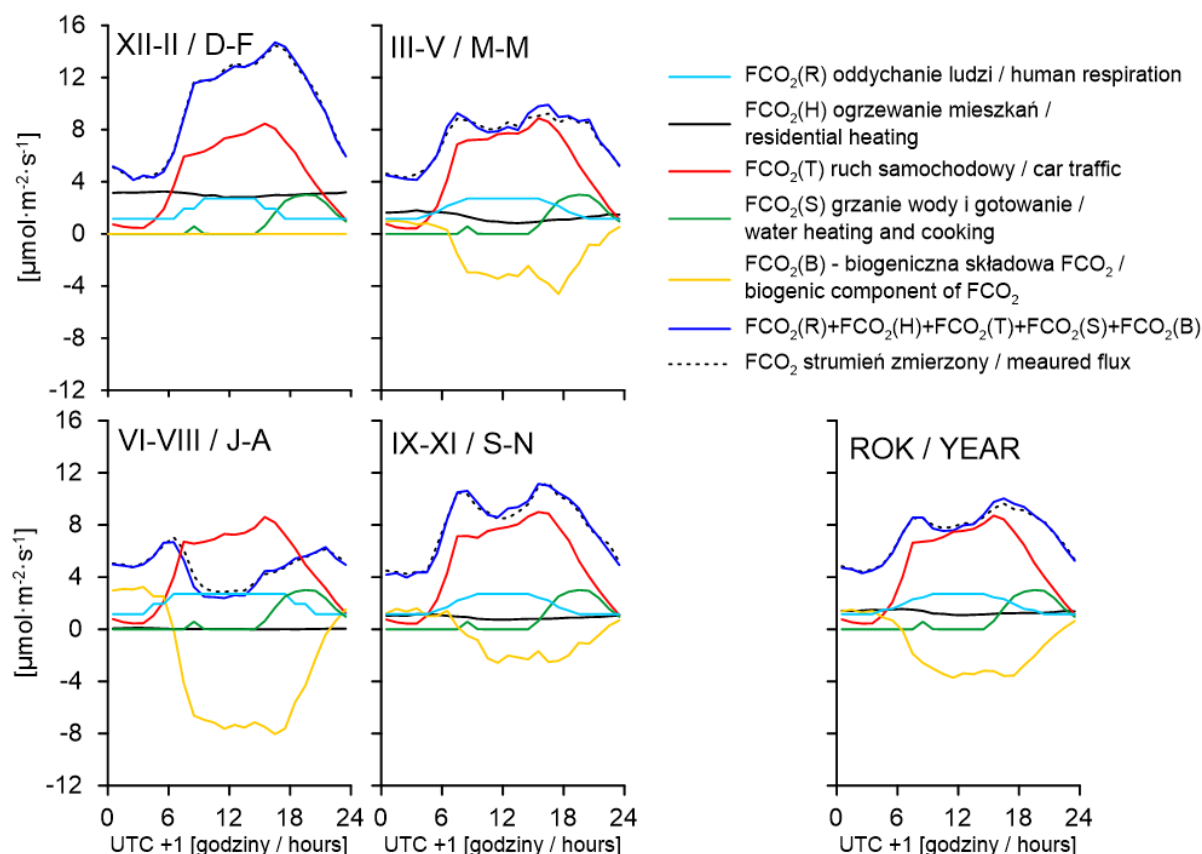
Rys. 4. Średnia dobowa zmienność FCO<sub>2</sub> w zimie (a), wiosną (b), latem (c) i jesienią (d) oraz średnia dobowa zmienność w dniach roboczych (poniedziałek–piątek) oraz w sobotę i niedzielę (e) w centrum Łodzi w latach 2012–2015

Mean diurnal variability of FCO<sub>2</sub> in winter (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and mean diurnal variability during working days (Monday–Friday), Saturday and Sunday (e) in the centre of Łódź in the period 2012–2015

2022). Średnia wartość FCO<sub>2</sub> w całym okresie badawczym wyniosła 7,31 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

Wymiana CO<sub>2</sub> na terenach zurbanizowanych jest determinowana przez antropogeniczne emisje tego gazu, zatem zdecydowanie przeważają dodatnie wartości strumieni (93,9%). Z tego samego względu pionowa turbulencyjna wymiana CO<sub>2</sub> w centrum Łodzi charakteryzuje się wyraźną zmiennością roczną z podwyższonymi wartościami FCO<sub>2</sub> w chłodnej połowie roku (średnio 9,25 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> od listopada do kwietnia) oraz obniżonymi w ciepłej (średnio 5,36 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> od maja do października). Maksymalne 1-godzinne wartości FCO<sub>2</sub> obserwowane były w chłodnej połowie roku i sięgały 30–40 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. W skrajnych przypadkach podczas silnych mrozów w lutym oraz grudniu 2014 roku zanotowano FCO<sub>2</sub> o wartościach około 60 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Wartości ujemne FCO<sub>2</sub> wskazujące na przewagę poboru CO<sub>2</sub> z atmosfery w porównaniu z emisjami antropogenicznymi pojawiały się rzadko (6,1% przypadków), jedynie podczas okresu wegetacyjnego i nie przekraczały -10 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (rys. 3).

Niezależnie od pory roku zaobserwowano również typową dla obszarów zurbanizowanych dobową zmienność FCO<sub>2</sub> (rys. 4 a–d). Średnio w ciągu doby strumień CO<sub>2</sub> netto podczas każdej z pór roku charakteryzuje się wyraźnie wyższymi wartościami w ciągu dnia oraz minimalnymi, rzędu 4 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> w nocy. Najwyższe średnie wartości w ciągu doby zarejestrowano w zimie (powyżej 12 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>). Wszystkie średnie dobowe przebiegi FCO<sub>2</sub> cechuje występowanie podwójnego maksimum odzwierciedlającego emisje podczas porannego szczytu samochodowego (między godzinami 6:00 a 8:00 UTC + 1) oraz popołudniowo-wieczornego szczytu samochodowego połączonego z aktywnością mieszkańców w domach (między godzinami 14:00 a 20:00). Pomędzy wymienionymi szczytami wartości FCO<sub>2</sub> obniżają się o około 2–3 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, ale wciąż są wyraźnie wyższe od wartości nocnych. Wyjątkiem jest lato kiedy w godzinach południowych wymiana spada do około 4 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, co jest związane z poborem CO<sub>2</sub> atmosfery przez roślinność miejską. Ze względu jednak na niewielki od-



Rys. 5. Średnia dobowa zmienność składowych antropogenicznych ( $FCO_{2(R)}$ ,  $FCO_{2(H)}$ ,  $FCO_{2(T)}$ ,  $FCO_{2(S)}$ ) oraz biogenicznych ( $FCO_{2(B)}$ ) na tle strumieni  $CO_2$  netto zmierzonych metodą kowariancji wirów w centrum Łodzi w latach 2012–2015

Mean diurnal variability of anthropogenic ( $FCO_{2(R)}$ ,  $FCO_{2(H)}$ ,  $FCO_{2(T)}$ ,  $FCO_{2(S)}$ ) and biogenic ( $FCO_{2(B)}$ )  $CO_2$  components against the background of  $CO_2$  net fluxes measured by the eddy covariance method in the centre of Łódź in the period 2012–2015

setek roślinności w badanym fragmencie centrum Łodzi pobór ten nie jest na tyle intensywny, by zrównoważyć emisje antropogeniczne (rys. 4c).

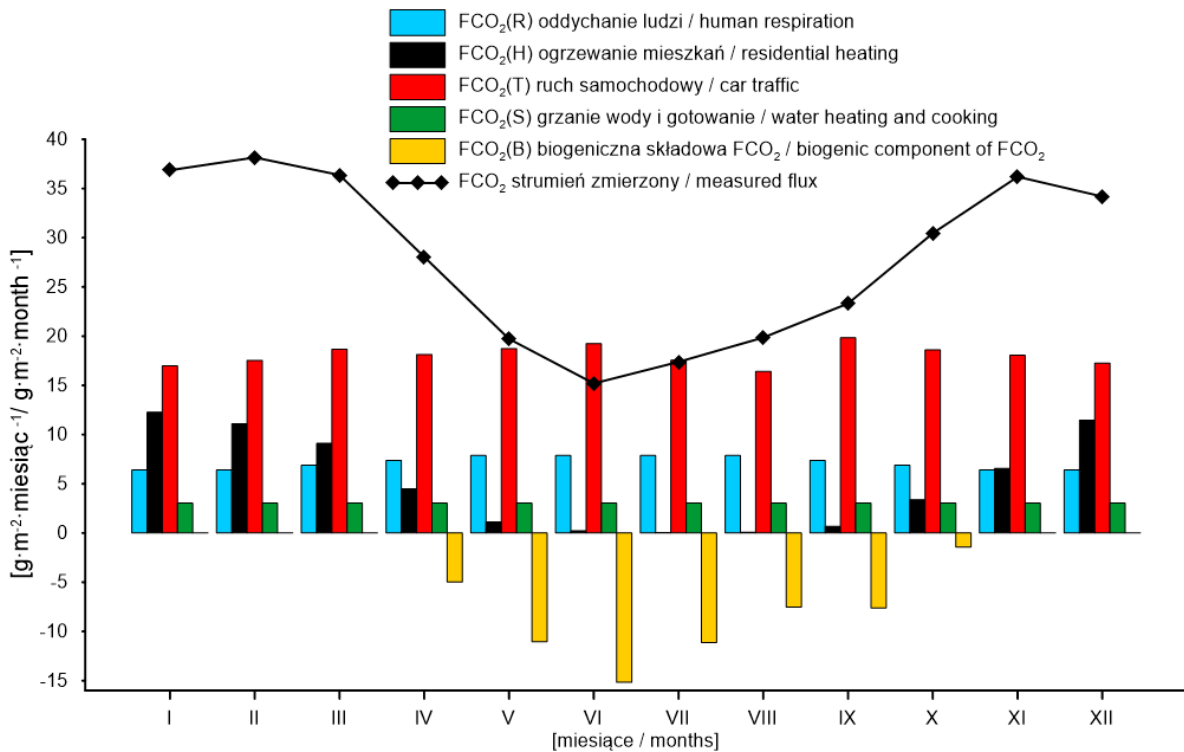
Emisje związane z aktywnością mieszkańców determinują również typową dla miast tygodniową zmienność  $FCO_2$ , co potwierdzają średnie dobowe przebiegi strumieni obliczone dla całego okresu badawczego w dniach roboczych, w soboty oraz niedziele (rys. 4e). Pionowa wymiana dwutlenku węgla jest dodatnia, ale wyraźnie mniej intensywna podczas weekendów. W sobotę i w niedzielę nie zaobserwowano porannego maksimum  $FCO_2$ , a popołudniowe jest około dwukrotnie niższe od maksimum obserwowanego średnio podczas dni roboczych.

Z punktu widzenia pionowej wymiany dwutlenku węgla powyższe rezultaty świadczą o tym, że centrum Łodzi to typowy obszar zurbanizowany umiarkowanych szerokości geograficznych, na którym strumienie o charakterze biogenicznym przez większą część roku odgrywają niewielką ro-

lę. Z kolei dominujący strumień antropogeniczny jest w rzeczywistości sumą wielu strumieni cząstkowych, również typowych dla obszarów miejskich, przy czym wydzielenie oraz ocena ilościowa każdego z nich nie jest możliwe. Zastosowanie opisanego wcześniej rozwiązania statystycznego pozwala jednak zidentyfikować oraz ilościowo oszacować wymianę  $CO_2$  związaną z kilkoma procesami typowymi dla obszarów zurbanizowanych. Średnie dobowe przebiegi wyznaczonych składowych  $FCO_2$  (rys. 5) oraz sum miesięcznych (rys. 6) wskazują na zróżnicowany udział poszczególnych składowych w zależności od pory roku.

Strumień  $CO_{2(R)}$  związany z oddychaniem mieszkańców badanego fragmentu centrum Łodzi charakteryzuje się zmiennością dobową niezależnie od pory roku (rys. 5) z podwyższonymi wartościami w ciągu dnia rzędu  $2,72 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz obniżonymi w nocy ( $1,16 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Taką zmienność związana jest z ludzkimi cechami fi-





Rys. 6. Miesięczne sumy składowych strumienia CO<sub>2</sub> netto w centrum Łodzi

Monthly totals of CO<sub>2</sub> net flux components in the centre of Łódź

zjologicznymi, które powodują, że człowiek wydycha więcej CO<sub>2</sub> w dzień, kiedy jest aktywny. W efekcie pojawia się również rytm roczny FCO<sub>2</sub>(R) z podwyższonymi wartościami strumienia w lecie, kiedy zwiększoną aktywność mieszkańców miasta determinuje dłuższy dzień. W ciągu roku udział FCO<sub>2</sub>(R) w sumarycznym strumieniu antropogenicznym FCO<sub>2</sub>(A) można uznać za znaczny (rys. 6), ponieważ stanowi on od 16,5% w zimie (6,39 g·m<sup>-2</sup>·miesiąc<sup>-1</sup>) do prawie 29% w lecie (7,87 g·m<sup>-2</sup>·miesiąc<sup>-1</sup>).

Bardziej zróżnicowaną zmiennością roczną cechuje się strumień CO<sub>2</sub>(H) determinowany przez ogrzewanie mieszkań w centrum Łodzi (rys. 6). Jego udział w sumarycznym strumieniu antropogenicznym FCO<sub>2</sub>(A) zmienia się od 0% (od czerwca do sierpnia) do prawie 32% w grudniu (12,26 g·m<sup>-2</sup>·miesiąc<sup>-1</sup>). W ciągu doby (pomijając lato) zróżnicowanie składowej FCO<sub>2</sub>(H) jest niezbyt duże (rys. 5). W zimie w nocy strumień ten osiąga wartości rzędu 3,19 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, w dzień jest nieznacznie niższy (2,83 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>).

Za najistotniejszą składową sumarycznego strumienia antropogenicznego należy uznać strumień CO<sub>2</sub>(T) odzwierciedlający emisje CO<sub>2</sub> generowane przez ruch samochodowy (rys. 6). Jego udział w FCO<sub>2</sub>(A) w ciągu całego roku nie spada

poniżej 44% w zimie (strumień miesięczny równy 16,97 g·m<sup>-2</sup>·miesiąc<sup>-1</sup>), osiągając maksymalne wartości rzędu 64% (strumień miesięczny równy 19,2 g·m<sup>-2</sup>·miesiąc<sup>-1</sup>) w czerwcu i wrześniu. Wyraźnie widoczne obniżenie wartości FCO<sub>2</sub>(T) w lipcu oraz w sierpniu tłumaczyć należy zmniejszonym ruchem samochodowym podczas wakacji. Niezależnie od pory roku średnia dobowo zmienność FCO<sub>2</sub>(T) posiada charakterystyczną zmienność dobową z dwoma maksimumami w ciągu dnia (rys. 5). Pierwsze maksimum (w zależności od pory roku strumienie rzędu 6–7 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) pojawia się w godzinach 6:00–8:00 UTC +1 i jest związane z porannym szczytem ruchu samochodowego. Najwyższa wartość dobowo FCO<sub>2</sub>(T) notowana jest w godzinach 16:00–17:00 (strumienie od 8,5 do 9,0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) podczas popołudniowego szczytu ruchu samochodowego. W kolejnych godzinach, niezależnie od pory roku, FCO<sub>2</sub>(T) powoli spada, by w godzinach od 2:00 do 4:00 UTC +1 osiągnąć wartości zbliżone do 0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

Za najmniej istotną składową FCO<sub>2</sub>(A) w centrum Łodzi można uznać strumień CO<sub>2</sub>(S) związany z emisjami CO<sub>2</sub> podczas podgrzewania wody i gotowania. Udział tej składowej w sumarycznym FCO<sub>2</sub>(A) w ciągu roku nie przekracza 10% (rys. 6). W ciągu doby niewielkie wartości tego strumienia

pojawiają się w godzinach porannych, podczas gdy wartości maksymalne (do  $3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) osiągane są po południu oraz wieczorem (rys. 5).

Wyraźną zmiennością roczną charakteryzuje się za to w centrum Łodzi biogeniczna składowa wymiany  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_{2(\text{B})}$ ). Ze względu na brak aktywności biologicznej roślin związanej z niskimi temperaturami powietrza  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  od listopada do marca jest równa 0 (rys. 6). W pozostałych miesiącach charakteryzuje się wartościami ujemnymi (do  $-15,2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  w czerwcu), co oznacza przewagę pochłaniania  $\text{CO}_2$  przez rośliny nad procesem ich oddychania. Taki zwrot strumienia  $\text{CO}_{2(\text{B})}$  z punktu widzenia wymiany netto w centrum Łodzi ma bardzo istotne znaczenie. Z porównania miesięcznych  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  i  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  wynika, że strumień biogeniczny niweluje antropogeniczną emisję od 5% do 15% w – odpowiednio – październiku i kwietniu, aż po 50% w czerwcu (rys. 6).  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  jest ponadto jedyną składową (z pominięciem zimy) zmieniającą zwrot wymiany w ciągu doby. Wiosną, latem i jesienią średni przebieg dobowy strumienia biogenicznego charakteryzuje się ujemnymi wartościami w ciągu doby ze względu na przewagę produkcji pierwotnej brutto nad oddychaniem. W nocy rośliny uwalniają  $\text{CO}_2$  podczas oddychania, co w efekcie daje dodatnie wartości  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  do  $3,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (rys. 5).

## Wnioski

Pomiary pionowej wymiany  $\text{CO}_2$  między podłożem a atmosferą realizowane są przez coraz większą liczbę grup badawczych na świecie. Mimo problemów o charakterze logistycznym i metodologicznym, taki trend obserwuje się również na terenach zurbanizowanych (Nordbo i in. 2012; Christen 2014; Oke i in. 2017). Specyfika terenu miejskiego oraz mnogość i bardzo zróżnicowana intensywność źródeł  $\text{CO}_2$  powodują jednak brak możliwości bezpośredniego pomiaru składowych wymiany netto. Ilościowe szacowanie składowych  $\text{FCO}_2$  netto realizowane jest za pomocą metod statystycznych, takich jak opisana w opracowaniu metoda, którą zaproponowali Menzer i McFadden (2017). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż dzięki statystycznemu rozkładowi  $\text{FCO}_2$  netto na składowe możliwa była jakościowa oraz ilościowa ocena udziału biogenicznego i antropogenicznego komponentu w całości wymiany w centrum Łodzi. Ponadto oszacowano, w jakim stopniu wymiana  $\text{CO}_2$  determinowana jest przez emisje związane z ruchem samochodowym,

ogrzewaniem mieszkań, codzienną aktywnością czy oddychaniem mieszkańców miasta. Należy podkreślić również zgodność między statystycznie wyznaczonymi sumami wymiany a zmierzonymi bezpośrednio wartościami  $\text{FCO}_2$  netto (rys. 5). Jednocześnie zaznaczyć należy, że powyższy algorytm nie jest pozbawiony wad. Wątpliwości budzić może chociażby wyznaczanie składowej  $\text{FCO}_{2(\text{H})}$  (ogrzewanie mieszkań) – zależność korelacyjna między strumieniami a temperaturą powietrza nie jest zbyt silna (rys. 2a). Z kolei w okresie letnim należałoby wydzielić również składową determinowaną przez intensywne używanie klimatyzacji przez mieszkańców Łodzi. Mimo powyższych uwag należy podkreślić, iż opisany w opracowaniu algorytm umożliwia pogłębioną analizę pionowej turbulencyjnej wymiany  $\text{CO}_2$  między obszarem zurbanizowanym a atmosferą.

Praca finansowana ze środków Uniwersytetu Łódzkiego (projekt IDUB, decyzja nr 57/2021). Autorzy dziękują Urzędowi Miasta Łodzi (Biuro Inżyniera Miasta) za udostępnienie danych o ruchu samochodowym w Łodzi.

## Literatura

- Ao X., Grimmond C.S.B., Chang Y., Liu D., Tang Y., Hu P., Wang Y., Zou J., Tan J. 2016. Heat, water and carbon exchanges in the tall megacity of Shanghai: challenges and results. *International Journal of Climatology* 36: 4608-4624.
- Aubinet M., Vesala T., Papale D. 2012. Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer Netherlands.
- Bezyk Y., Sówka I., Górka M. 2021. Assessment of urban  $\text{CO}_2$  budget: Anthropogenic and biogenic inputs. *Urban Climate* 39: 100949.
- Bezyk Y., Górka M., Sówka I., Nęcki J., Strąpoć D. 2023. Temporal dynamics and controlling factors of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  variability in the urban atmosphere of Wrocław, Poland. *Science of Total Environment* 893: 164771.
- Björkegren A., Grimmond C.S.B. 2018. Net carbon dioxide emissions from central London. *Urban Climate* 23: 131-158.
- Buckley S.M., Mitchell M.J., McHale P.J., Millard G.D. 2016. Variations in carbon dioxide fluxes within a city landscape: Identifying a vehicular influence. *Urban Ecosystems* 19: 1479-1498.

- Burba G. 2021. Eddy Covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications. LI-COR Biosciences. Lincoln. Nebraska.
- Chamberlain S.D., Ingrassia A.R., Sparks J.P. 2016. Sourcing methane and carbon dioxide emissions from a small city: Influence of natural gas leakage and combustion. *Environmental Pollution* 218: 102-110.
- Christen A. 2014. Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities. *Urban Climate* 10: 241-260.
- Christen A., Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a Central European city. *International Journal of Climatology* 24: 1395-1421.
- Duan X., Gao Z., Xu Q., Zhou S., Qion K., Yang Y. 2022. A benchmark dataset of diurnal- and seasonal-scale radiation, heat, and CO<sub>2</sub> fluxes in a typical East Asian monsoon region. *Earth System Science Data* 14: 4153-4169.
- Foken T. 2008. *Micrometeorology*. Springer, Berlin.
- Fortuniak K. 2003. Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego.
- Fortuniak K. 2010. Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego.
- Fortuniak K., Pawlak W. 2015. Selected spectral characteristics of turbulence over an urbanized area in the center of Łódź, Poland. *Boundary Layer Meteorology* 154: 137-156.
- Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M. 2013. Integral turbulence statistics over a central European city centre. *Boundary Layer Meteorology* 146: 257-276.
- Gioli B., Toscano P., Lugato E., Matese A., Miglietta F., Zaldei A., Vaccari F.P. 2012. Methane and carbon dioxide fluxes and source partitioning in urban areas: The case study of Florence, Italy. *Environmental Pollution* 164: 125-131.
- Google Earth. 2024. Online: <https://earth.google.com> (data ostatniego dostępu: 01.03.2024).
- Goret M., Masson V., Schoetter R., Moine M.P. 2019. Inclusion of CO<sub>2</sub> flux modelling in an urban canopy layer model and an evaluation over an old European city centre. *Atmospheric Environment: X* 3: 100042.
- Grimmond C.S.B., Oke T.R. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology* 38: 1262-1292.
- Helfter C., Tremper A.H., Halios C.H., Kotthaus S., Björkegren A., Grimmond C.S.B., Barlow J.F., Nemitz E. 2016. Spatial and temporal variability of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 10543-10557.
- IPCC. 2023. Lee H., Romero J. (red.). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jasek A., Zimnoch M., Gorczyca Z., Smula E., Rożański K. 2014. Seasonal variability of soil CO<sub>2</sub> flux and its carbon isotope composition in Krakow urban area, Southern Poland. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 50: 143-155.
- Jasek-Kamińska A., Zimnoch M., Wachniew P., Rożański K. 2020. Urban CO<sub>2</sub> Budget: Spatial and Seasonal Variability of CO<sub>2</sub> Emissions in Krakow, Poland. *Atmosphere* 11(6): 629.
- Järvi L., Havu M., Ward H.C., Bellucco V., McFadden J.P., Tiovonen T., Heikinheimo V., Kolari P., Riikonen A., Grimmond C.S.B. 2018. Spatial modelling of local-scale biogenic and anthropogenic carbon dioxide emissions in Helsinki. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 124(15): 8363-8384.
- Kleingeld E., van Hove B., Elbers J., Jacobs C. 2018. Carbon dioxide fluxes in the city centre of Arnhem, a middle-sized Dutch city. *Urban Climate* 24: 994-1010.
- Kłysik K. 1998. Charakterystyka powierzchni miejskiej Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia. *Acta Universitatis Lodziensis – Folia Geographica Physica* 3: 173-185.
- Kotthaus S., Grimmond C.S.B. 2014a. Energy exchange in a dense urban environment – Part I: Temporal variability of long-term observations in central London. *Urban Climate* 10: 261-280.
- Kotthaus S., Grimmond C.S.B. 2014b. Energy exchange in a dense urban environment – Part II: Impact of spatial heterogeneity of the Surface. *Urban Climate* 10: 281-307.
- Lee X., Massman W., Law B. 2004. *Handbook of Micrometeorology. A guide for surface flux measurement and analysis*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

- Matthews B., Schume H. 2022. Tall tower eddy covariance measurements of CO<sub>2</sub> fluxes in Vienna, Austria. *Atmospheric Environment* 274: 118941.
- Menzer O., McFadden J.P. 2017. Statistical partitioning of a three-year time series of direct urban net CO<sub>2</sub> flux measurements into biogenic and anthropogenic components, *Atmospheric Environment* 170: 319-333.
- 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* 43: 1700-1710.
- Nicolini G., Castaldi S., Fratini G., Valentini R. 2013. A literature overview of micrometeorological CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux measurements in terrestrial ecosystems. *Atmospheric Environment* 81: 311-319.
- Nordbo A., Järvi L., Haapanala S., Wood C.R., Vesala T. 2012. Fraction of natural area as main predictor of net CO<sub>2</sub> emissions from cities. *Geophysical Research Letters* 39: L20802.
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K., Kłysik K., Oke T.R. 2006a. Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre. *Theoretical and Applied Climatology* 84: 103-115.
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K., Pawlak W. 2006b. Intra-urban differences of surface energy fluxes in a central European city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45: 125-136.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press, UK.
- Pawlak W., Fortuniak K. 2016. Eddy covariance measurements of the net turbulent methane flux in the city centre – results of 2-year campaign in Łódź, Poland. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 8281-8294.
- 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* 31: 232-243.
- Pawlak W., Fortuniak K., Siedlecki M., Zieliński M. 2016. Urban – Wetland contrast in turbulent exchange of methane. *Atmospheric Environment* 145: 176-191.
- Roth M., Jansson C., Velasco E. 2017. Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighborhood in a tropical city. *International Journal of Climatology* 37: 2679-2698.
- Sargent M., Barrera Y., Nehr Korn T., Hutyrá L.R., Gately C.K., Jones T., McKain K., Sweeney C., Hegarty J., Hardiman B., Wang J.A., Wofsy S.C. 2018. Anthropogenic and biogenic CO<sub>2</sub> fluxes in the Boston urban region. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 115: 7491-7496.
- Schmid H.P. 1997. Source areas for scalar and scalar fluxes. *Boundary Layer Meteorology* 67: 293-318.
- Schmutz M., Vogt R., Feigenwinter C., Parlow E. 2016. Ten years of eddy covariance measurements in Basel, Switzerland: Seasonal and interannual variabilities of urban CO<sub>2</sub> mole fraction and flux. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 121: 8649-8667.
- Stagakis S., Chrysoulakis N., Spyridakis N., Feigenwinter C. 2019. Eddy Covariance measurements and source partitioning of CO<sub>2</sub> emissions in an urban environment: application for Heraklion, Greece. *Atmospheric Environment* 201: 278-292.
- Statystyka Łodzi. Statistics of Łódź. 2012. Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Statystyka Łodzi. Statistics of Łódź. 2014. Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Statystyka Łodzi. Statistics of Łódź. 2016. Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Takano T., Ueyama M. 2021. Spatial variations in daytime methane and carbon dioxide emissions in two urban landscapes, Sakai, Japan. *Urban Climate* 36: 100798.
- Ueyama M., Ando T. 2016. Diurnal, weekly, seasonal, and spatial variabilities in carbon dioxide flux in different urban landscapes in Sakai, Japan. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 14727-14740.
- Ward H., Evans J., Grimmond C. 2013. Multi-season eddy covariance observations of energy, water and carbon fluxes over a suburban area in Swindon, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(9): 4645-4666.
- Weissert L.F., Salmond J.A., Turnbull J.C., Schendenmann L. 2016. Temporal variability in the sources and fluxes of CO<sub>2</sub> in a residential area in an evergreen subtropical city. *Atmospheric Environment* 143: 164-176.
- Zieliński M., Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M. 2013. Turbulent sensible heat flux in Łódź, Central Poland, obtained from scintillometer and eddy covariance measurements. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 603-613.



## Summary

Cities, despite occupying a negligible percentage of land area, account for a very large share of global emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases (IPCC 2023). Urbanized areas, especially city centres dominated by artificial surfaces, have a limited capacity to absorb carbon dioxide from the atmosphere. Instead, their characteristic feature is the multitude of processes based on the burning of fossil fuels, leading to the release of significant amounts of CO<sub>2</sub>. This study aims to try to separate the components of the net CO<sub>2</sub> flux in the centre of Łódź. For this purpose, the statistical solution that Menzer and McFadden (2017) proposed for American cities was applied. The measurements used in the study were carried out at the site at 81 Lipowa Street (51°45'45"N, 19°26'43"E, 203 m a.s.l.) in the western part of the centre of Łódź. The surroundings of the site are mostly (about 62%) artificial surfaces, streets, sidewalks, buildings, etc. The remaining 38% are scattered (rather than compact) areas covered with grass or planted with trees, mainly along streets. In addition, the study used traffic data recorded with a time step of 30 minutes using induction loops at the intersection of Kopernika and Kielińskiego Streets, located about 150 m south-east of the site. The eddy covariance method was used to determine CO<sub>2</sub> fluxes in the centre of Łódź. This method allows accurate, continuous, long-term measurements of vertical turbulent mass fluxes with a fixed time step (in this case, 1 hour). All required corrections and procedures were applied to assess the quality of the obtained data. The application of the eddy covariance method made it possible to obtain an almost four-year (from January 1, 2012 to September 24, 2015) series of 1-hour FCO<sub>2</sub> values. The fluxes determined in this way have, first, averaged values for the current source area (reflecting the flux from a large urban area rather than individual sources of CO<sub>2</sub> to the atmosphere) and, second, a net character showing to what extent the release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere in successive hours outweighed its uptake by the urban surface. In consequence, the FCO<sub>2</sub> time series determined by the eddy covariance method offers the possibility of a detailed analysis of FCO<sub>2</sub> variability at different time scales, but by definition excludes the possibility of analysing the net flux components. Meanwhile, in the centre of Łódź, as in other cities, the net CO<sub>2</sub> flux is determined by both anthropogenic FCO<sub>2(A)</sub> and, despite the relatively low proportion of areas

covered by vegetation, biogenic FCO<sub>2(B)</sub> fluxes. The extraction of the above components was carried out according to the statistical method that Menzer and McFadden (2017) used in the US city of Saint Paul (Minnesota, USA). In the case of FCO<sub>2(A)</sub>, the authors of the method assume that anthropogenic exchange is determined by four main components reflecting the release of carbon dioxide into the atmosphere as a result of fossil fuel combustion during residential heating FCO<sub>2(H)</sub>, in vehicular traffic FCO<sub>2(T)</sub>, during cooking and water heating FCO<sub>2(S)</sub>, and during human respiration FCO<sub>2(R)</sub>.

The variability of the net FCO<sub>2</sub> flux recorded in the centre of Łódź in 2012–2015 shows typical features known from the centres of other cities of temperate latitudes. The average value of FCO<sub>2</sub> over the entire study period was 7.31 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. CO<sub>2</sub> exchange in urbanised areas is determined by anthropogenic emissions of this gas; therefore, positive fluxes prevail (93.9%). For the same reason, the vertical turbulent exchange of CO<sub>2</sub> in the centre of Łódź is characterised by a pronounced annual variability with elevated FCO<sub>2</sub> values in the cool half-year (an average of 9.25 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> from November to April) and reduced values in the warm half-year (an average of 5.36 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> from May to October). Maximum 1-hour FCO<sub>2</sub> values were observed in the cold half-year and reached 30–40 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. In extreme cases, during the severe frosts of February and December 2104, FCO<sub>2</sub> values of about 60 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> were recorded. Negative FCO<sub>2</sub> values indicating the predominance of atmospheric CO<sub>2</sub> uptake compared to anthropogenic emissions appeared rarely (6.1% of cases), only during the growing season, and did not exceed -10 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Regardless of the season, daily and weekly variability of FCO<sub>2</sub>, typical of urban areas, was also observed.

The application of the statistical Menzer–McFadden (2017) method makes it possible to identify and quantify the CO<sub>2</sub> exchange associated with several processes typical of urbanised areas. The average daily patterns of the determined FCO<sub>2</sub> components and monthly totals indicate that the contribution of each component varies with the season. The FCO<sub>2(R)</sub> flux associated with the respiration of the residents of the studied part of the centre of Łódź is characterised by diurnal variability regardless of the season, with elevated values during the day of 2.72 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and reduced values at night (1.16 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>). Throughout the year, the contribution of FCO<sub>2(R)</sub>

to the total anthropogenic flux of  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  ranges from 16.5% in winter ( $6.39 \text{ g}\cdot\text{month}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) to almost 29% in summer ( $7.87 \text{ g}\cdot\text{month}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). The  $\text{FCO}_{2(\text{H})}$  flux determined by residential heating in the centre of Łódź is characterised by a more varied annual variation. Its contribution to the total anthropogenic flux of  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  varies from 0% (from June to August) to almost 32% in December ( $12.26 \text{ g}\cdot\text{month}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). The  $\text{FCO}_{2(\text{T})}$  reflecting  $\text{CO}_2$  emissions generated by car traffic should be considered the most significant component of the total anthropogenic flux. Its contribution to  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  throughout the year does not fall below 44% in winter (monthly flux equal to  $16.97 \text{ g}\cdot\text{month}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) reaching maximum values of the order of 64% (monthly flux equal to  $19.2 \text{ g}\cdot\text{month}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in June and September. In contrast, the flux of  $\text{FCO}_{2(\text{S})}$  associated with  $\text{CO}_2$  emissions during water heating and cooking can be considered the least signifi-

cant component of  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  in the centre of Łódź. The contribution of this component to the total  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  over the year does not exceed 10%. A pronounced annual variability is characterised in the centre of Łódź by the biogenic component of  $\text{CO}_2$  exchange ( $\text{FCO}_{2(\text{B})}$ ). Due to the lack of plant biological activity associated with low air temperatures,  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  from November to March is equal to 0. In the remaining months, it is characterised by negative values (up to  $-15.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  in June), which means the predominance of  $\text{CO}_2$  uptake by plants over their respiration process. Such a direction of the  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  flux from the point of view of net exchange in the centre of Łódź is very significant. A comparison of monthly  $\text{FCO}_{2(\text{B})}$  and  $\text{FCO}_{2(\text{A})}$  shows that the biogenic flux offsets anthropogenic emissions by 5 to 15% in October and April, respectively, up to 50% in June.