
ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN – POLONIA

VOL. LXXII, z. 2

SECTIO B

2017

Katedra Meteorologii i Klimatologii
Wydział Nauk Geograficznych
Uniwersytet Łódzki

WŁODZIMIERZ PAWLAK

Wpływ typu zabudowy na intensywność turbulencyjnej wymiany
masy i energii w Łodzi – wstępne wyniki badań porównawczych
z lat 2013–2016

The impact of development type on the intensity of turbulent exchange of mass and energy
in Łódź – the selected results of measurements from the years 2013–2016

Słowa kluczowe: strumień turbulencyjny, metoda kowariancji wirów, klimat miasta, gazy cieplarniane

Keywords: turbulent flux, eddy covariance method, urban climate, greenhouse gases

WPROWADZENIE

Badania nad odrębnością klimatyczną terenów zurbanizowanych prowadzone są od wielu lat. Geometryczna i fizyczna odmienność powierzchni miejskich w porównaniu z obszarami naturalnymi lub użytkowanymi rolniczo powoduje, że prawie każdy z elementów meteorologicznych obserwowanych na terenie miast charakteryzuje się zmiennością o odmiennych cechach w porównaniu z terenami zamiejskimi (Fortuniak 2003). Podobne różnice obserwowane są w przypadku turbulencyjnej wymiany masy i energii, charakterystycznej dla warstwy granicznej atmosfery. Z prowadzonych w ciągu ostatnich kilkunastu lat badań wynika, iż w miastach występuje silniejszy niż poza nimi strumień ciepła jawnego. Obniżone wartości strumienia ciepła utajonego sugerują z kolei mniej intensywną pionową wymianę pary wodnej między miastem a atmosferą (Offerle i in. 2006a; Fortuniak 2010; Kotthaus, Grimmond 2014a). Charakterystyczną cechą terenów

zurbanizowanych jest również intensywne spalanie paliw kopalnych, zarówno podczas procesów przemysłowych, jak również w silnikach samochodów czy podczas ogrzewania domów i mieszkań (Heeb i in. 2003; Nam i in. 2004; Pawlak i in. 2011, Christen 2014). Procesom tym towarzyszy zatem antropogeniczna emisja gazów cieplarnianych, zwłaszcza dwutlenku węgla oraz metanu, które przedostają się do atmosfery poprzez niecałkowite spalanie metanu zawartego w gazie ziemnym, wycieki z gazociągów, z systemów kanalizacyjnych oraz wysypisk śmieci (Nicolini i in. 2013; Christen 2014; Pawlak, Fortuniak, 2016). Miasta zatem, mimo iż w porównaniu z terenami naturalnymi lub rolniczymi zajmują znikomy odsetek powierzchni, emitują z jednostkowej powierzchni co najmniej kilkakrotnie więcej dwutlenku węgla w porównaniu z pochłaniającymi go terenami zamiejskimi (Pawlak i in. 2011; Nordbo i in. 2012; Christen 2014) lub, jak w przypadku metanu, są źródłem co najmniej porównywalnym z terenami podmokłymi (Gioli i in. 2012; Helfter i in. 2016; Pawlak i in., 2016). Jednocześnie trudno uznać miasta za jednorodne w sensie przestrzennym źródła energii oraz gazów cieplarnianych. Zmieniająca się gęstość zabudowy, odsetek roślinności czy intensywność ruchu samochodowego powoduje, że turbulencyjne strumienie masy i energii różnią się znacznie między najgęściej zabudowanym centrum oraz innymi dzielnicami czy terenami podmiejskimi. Prowadzone do tej pory pomiary turbulencyjnej wymiany masy i energii koncentrowały się na centrach miast, a tylko w niektórych przypadkach realizowano je w różnych typach zabudowy (Christen, Vogt 2004; Offerle i in. 2006b; Fortuniak 2010; Kotthaus, Grimmond 2014b).

W niniejszej pracy przedstawione zostały wybrane wyniki pomiarów turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 przeprowadzone w centrum Łodzi w latach 2013–2015 oraz w dzielnicy poprzemysłowej w 2016 roku. Odmienna zabudowa i sposób użytkowania badanych obszarów były przyczyną różnic w wartościach badanych strumieni turbulencyjnych.

OBSZAR BADAŃ

Wyniki pomiarów opisanych w opracowaniu pochodzą z dwóch kampanii pomiarowych przeprowadzonych w Łodzi. Pierwszą z nich zrealizowano w latach 2013–2015 w centrum miasta (stanowisko LC – ryc. 1 i 2) przy ulicy Lipowej 81. Otoczenie stanowiska charakteryzowało się gęstą zabudową oraz charakterystyczną dla centrum Łodzi siecią kanionów miejskich udostępnionych dla ruchu samochodowego. Budynki to głównie 3–4-piętrowe kamienice, a średnia wysokość zabudowy sięgała około 10 m. W tej części miasta brak typowego dla innych miast sektora centrum z wysokimi budynkami wyraźnie

przewyższającymi średnią zabudowę. Wszystkie powierzchnie sztuczne (budynki, ulice, chodniki, itd.) zajmują ~62% (Kłysik 1998, tab. 1), pozostałe powierzchnie pokryte były roślinnością, głównie trawą, a jedynie ~10% to drzewa. Gęstość zabudowy jest nieco (około 10%) większa na północ i wschód od stanowiska. Zestaw pomiarowy strumieni turbulencyjnych zainstalowany został na maszcie na wysokości 37 m nad podłożem i około 27 metrów nad powierzchnią dachów (Fortuniak i in. 2013; Fortuniak, Pawlak 2015). Budynki w otoczeniu stanowiska pomiarowego LC w zdecydowanej większości mają charakter mieszkalny, przy czym wiele z nich ogrzewanych jest za pomocą indywidualnych pieców.



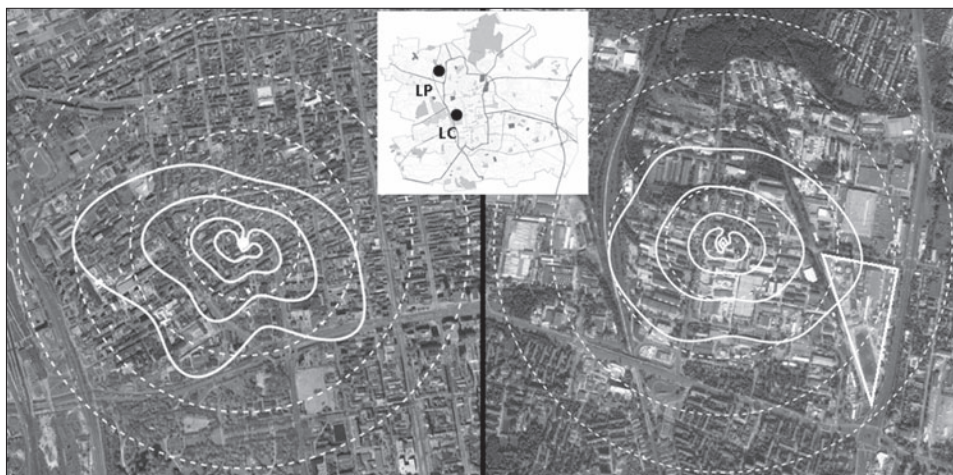
Ryc. 1. Otoczenie stanowisk pomiarowych turbulencyjnych strumieni masy i energii w centrum Łodzi (LC, górna fotografia) oraz w dzielnicy poprzemysłowej (LP, dolna fotografia)

Fig. 1. Surroundings of turbulent fluxes of mass and energy measurement sites in the center of Łódź (LC, top photo) and postindustrial district (LP, bottom photo)

Tab. 1. Podstawowe charakterystyki stanowisk pomiarowych turbulencyjnych strumieni masy i energii w Łodzi (LC – centrum, LP – dzielnica poprzemysłowa)

Tab. 1. Basic characteristics turbulent fluxes of mass and energy measurement sites in Łódź (LC – city center, LP – postindustrial district)

Punkt pomiarowy <i>Measurement site</i>	Wysokość pomiarów zH <i>Measurement height zH</i>	Współczynnik szorstkości $Z0$ <i>Roughness length $z0$</i>	Średnia wysokość budynków <i>Mean buildings height</i>	Odsetek powierzchni sztucznych <i>Artificial surfaces fraction</i>	Odsetek powierzchni roślinnych <i>Vegetated surfaces fraction</i>
	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
LC	37	2,5	10,2	~60	~40
LP	26	1,36	8,5	~40	~60



Ryc. 2. Obszary źródłowe turbulencyjnych strumieni masy i energii na stanowiskach pomiarowych LC (lewy) i LP (prawy) obliczone dla stratyfikacji chwiejnej z prawdopodobieństwem $P = 25, 50, 75$ i 90% (białe izolinie). Białe okręgi oznaczają odległości rzędu 250 i 500 metrów od punktów pomiarowych. Trójkątem oznaczono elektrociepłownię EC3

Fig. 2. Source areas of turbulent fluxes of mass and energy on measurement sites LC (left) and LP (right) calculated for unstable conditions with probability $P = 25, 50, 72$ i 90% (white lines). White circles indicate 250 m and 500 m distances from the measurement sites. White triangle indicates power plant EC3

Druga kampania pomiarowa odbyła się w 2016 roku na terenie dzielnicy przemysłowej (stanowisko LP – ryc. 1 i 2) w odległości około 4,8 km na północ od stanowiska LC. Otoczenie stanowiska charakteryzowało się odmiennym typem zabudowy w porównaniu do LC. Była ona nieco mniej gęsta, a powierzchnie sztuczne zajmowały około 40% (Kłysik, 1998). Zamiast sieci kanionów miejskich i kamienic w tej części miasta dominowały szerokie ulice, hale przemysłowe w większości zamienione na hurtownie oraz parkingi samochodowe. Średnia wysokość zabudowy była w związku z tym mniejsza i sięgała 8,5 m. Pozostałe powierzchnie pokryte były roślinnością niską (głównie trawniki wzdłuż ulic i dookoła placów), a odsetek drzew rosnących wzdłuż ulic był nieco większy niż w okolicach stanowiska w centrum miasta (rzędu 20%, tab. 1). Gęstość zabudowy była równomierna we wszystkich kierunkach w okolicach stanowiska. W odległości 500–600 m w kierunku południowo-wschodnim występowało intensywne lokalne źródło gazów cieplarnianych do atmosfery, czyli elektrociepłownia EC3 (ryc. 2). Ze względu na to, iż pomiary na obu stanowiskach miały na celu wyznaczenie zmienności strumieni turbulencyjnych masy i energii o uśrednionych wartościach charakterystycznych dla centrum miasta i zabudowy przemysłowej, przed przystąpieniem do analizy wyników zdecydowano o tym,

aby przypadki z napływem powietrza z wymienionego wyżej sektora (kierunki wiatru między 80° a 160°) wyodrębnić jako oddzielny przypadek (stanowisko LP EC3). Zestaw pomiarowy strumieni turbulencyjnych zainstalowany został na wieży strażackiej na terenie Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej nr 10 przy ulicy Pojezierskiej 92, na wysokości 26 m nad podłożem i około 17,5 metrów nad powierzchnią dachów (Fortuniak i in. 2013; Fortuniak, Pawlak 2015). Budynek w otoczeniu stanowiska pomiarowego LP w zdecydowanej większości miały charakter użytkowy (hurtownie i duże salony handlowe), przy czym, w odróżnieniu od centrum, w większości ogrzewane były one z miejskiej sieci ciepłowniczej.

Dla obu stanowisk pomiarowych, za pomocą metody Schmidta (Schmid 1994; Fortuniak 2010), wyznaczono średni obszar źródłowy strumieni turbulencyjnych podczas występowania stratyfikacji chwiejnej (ryc. 2). W centrum miasta w zależności od kierunku wiatru sięgał on 200–750 m od stanowiska. Na stanowisku LP był on bardziej regularny i obejmował teren w promieniu 400–500 m od stanowiska. W warunkach stratyfikacji stałej oba obszary źródłowe były około dwukrotnie większe.

Turbulencyjne strumienie masy energii Q_H i Q_E oraz masy FCO_2 i FCH_4 wyznaczono za pomocą metody kowariancji wirów, którą uznaje się za najlepszą do realizacji długoterminowych, ciągłych pomiarów pionowej turbulencyjnej wymiany masy i energii między podłożem a atmosferą. Metoda zakłada, iż strumień badanej wielkości wyliczany jest jako kowariancja między fluktuacjami pionowej składowej prędkości wiatru w' , a fluktuacjami badanej wielkości X' w powietrzu w pewnym przedziale czasu (w wypadku tego opracowania była to 1 godzina):

$$FX = \overline{w'X'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})(X_i - \bar{X})$$

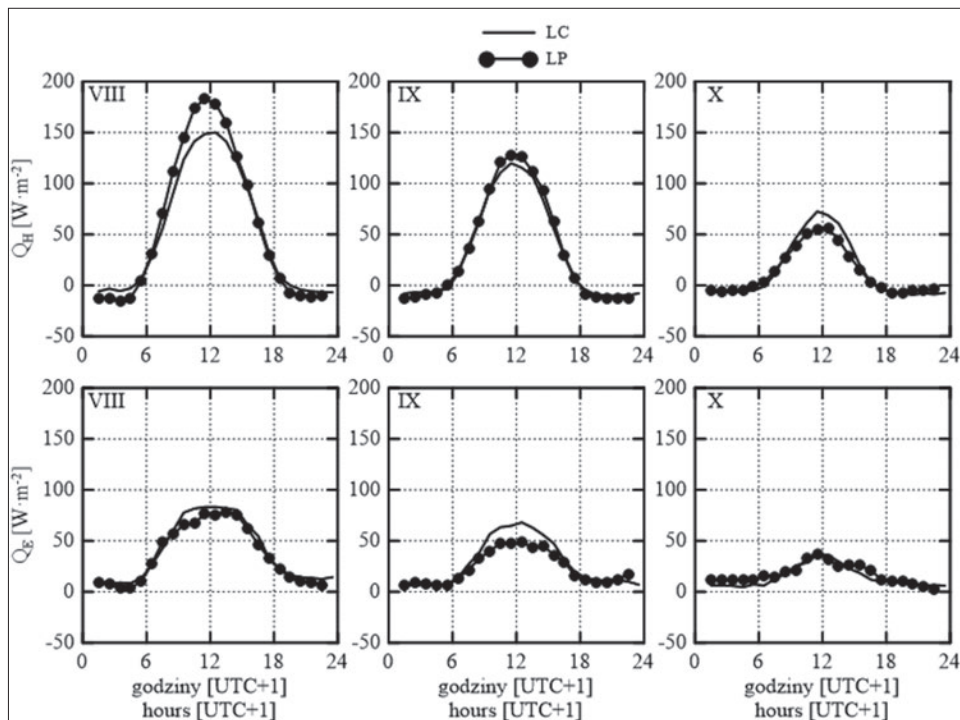
W pomiarach przeprowadzonych w Łodzi za badaną wielkość podstawiano temperaturę powietrza oraz koncentracje pary wodnej, dwutlenku węgla i metanu w powietrzu, co w konsekwencji pozwoliło na wyznaczenie turbulencyjnych strumieni, odpowiednio, ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E , strumieni dwutlenku węgla FCO_2 oraz metanu FCH_4 . W opracowaniu przyjęto popularną notację (Nordbo i in. 2012; Christen 2014), że strumień dodatni oznacza turbulencyjny transport energii lub masy w górę, od powierzchni czynnej do atmosfery, a strumień ujemny odwrotnie. Ponadto otrzymany w ten sposób strumień ma charakter netto, czyli stanowi algebraiczną sumę oddziałujących jednocześnie w dół i w górę strumieni (np. emisja antropogenicznego dwutlenku węgla i jego pobór podczas fotosyntezy). Zgodnie z założeniami metody kowariancji wirów (Lee

i in. 2004; Foken 2008; Fortuniak 2010; Aubinet i in. 2012) stanowiska wyposażono w czujniki fluktuacji pionowej składowej prędkości wiatru (anemometr ultradźwiękowy RMYoung 81000, RMYoung, USA) oraz analizatory gazowe koncentracji pary wodnej, dwutlenku węgla i metanu w powietrzu (Li7500 oraz Li7700, Li-cor, USA). Sprzęt na obu stanowiskach zainstalowany był na wysokości ponaddwukrotnie przewyższającej okoliczną zabudowę (Grimmond, Oke 1999). Fluktuacje rejestrowane były z częstotliwością 10 Hz.

Pomimo swojej prostoty metoda wymaga zastosowania wielu różnego rodzaju poprawek oraz szczegółowej kontroli jakości uzyskanych danych (Lee i in. 2004; Foken 2008; Fortuniak 2010; Aubinet i in. 2012). Na obu stanowiskach pomiarowych zastosowano identyczne rozwiązania uwzględniające poprawki na pomiar temperatury przez anemometr soniczny, separację czujników (tzw. maksymalizacja kowariancji), podwójną rotację układu współrzędnych wiatru, czy poprawkę na zmiany gęstości powietrza (tzw. poprawka WPL) (Lee i in. 2004; Foken 2008; Fortuniak 2010; Aubinet i in. 2012). W przypadku pomiarów fluktuacji koncentracji metanu zastosowano również zalecane przez producenta poprawki spektroskopowe (Li7700 Instruction Manual). Po wykonaniu obliczeń przeprowadzono kontrolę jakości wyników. Po pierwsze odrzucono strumienie o nierealistycznych wartościach oraz strumienie zmierzone podczas występowania opadu, kiedy analizatory gazowe mogą nieprecyzyjnie mierzyć koncentracje badanych gazów. Pozostałe dane sprawdzono z punktu widzenia ich stacjonarności za pomocą trzech różnych testów, zgodnie z metodyką stosowaną podczas poprzednich kampanii pomiarowych (Fortuniak 2010; Pawlak i in. 2011; Zieliński i in. 2013; Pawlak, Fortuniak 2016; Pawlak i in. 2016).

WYNIKI

Turbulencyjną wymianę ciepła jawnego i utajonego na obu stanowiskach charakteryzują zarówno podobieństwa, jak i różnice. Przede wszystkim niezależnie od typu zabudowy i miesiąca przeciętna zmienność dobowa turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego Q_H charakteryzuje się wyraźnym dobowym przebiegiem (ryc. 3). Na obu stanowiskach wartości minimalne obserwowano w godzinach nocnych, podczas gdy maksymalne w okolicach południa. Wraz z upływem czasu maksymalne wartości Q_H stawały się coraz niższe. We wrześniu maksima na obu stanowiskach przyjmowały podobne wartości rzędu $120\text{--}130 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. W sierpniu strumień ciepła jawnego w centrum osiągał wartości wyższe, rzędu $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, podczas gdy w dzielnicy poprzemysłowej był o $30\text{--}40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ wyższy. Przyczyny należy upatrywać w charakterze zabudowy dzielnicy poprzemysłowej. Rozległe powierzchnie sztuczne nagrzewały



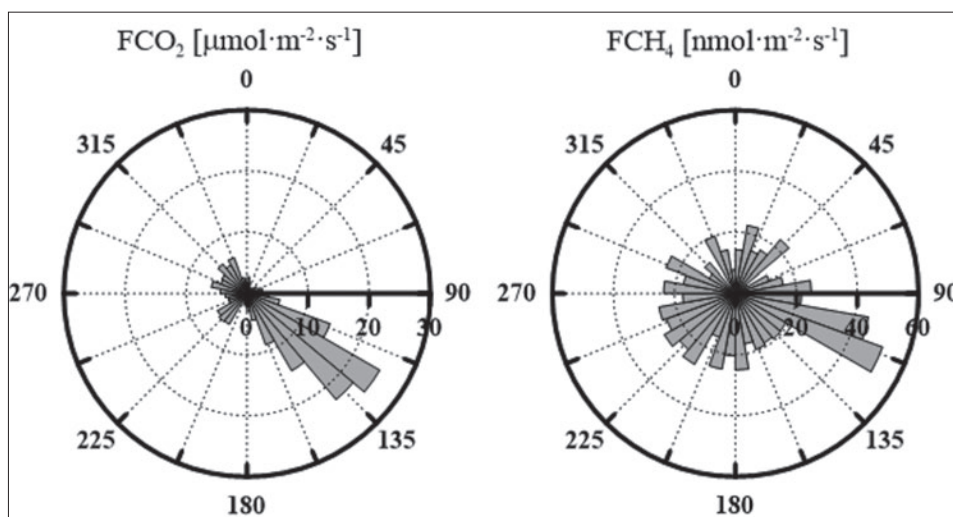
Ryc. 3. Średnie dobowe przebiegi turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E w centrum Łodzi (LC) oraz w dzielnicy poprzemysłowej (LP) w sierpniu, wrześniu i październiku
 Fig. 3. Mean daily courses of turbulent fluxes of sensible Q_H and latent Q_E heat fluxes in the center of Łódź (LC) and in the postindustrial district (LP) in September, October and November

się intensywniej w porównaniu z centrum miasta, gdzie ciepło akumulowane było również przez ulice i ściany budynków wewnątrz kanionów ulicznych. Z kolei nocne wychłodzenie powierzchni w okolicach stanowiska LP zachodziło szybciej niż w centrum, w efekcie czego zaobserwowano wyraźnie ujemne wartości Q_H w tej części doby. W październiku zaobserwowano sytuację odwrotną do sierpnia. W centrum miasta występowały wyższe maksymalne wartości strumienia ciepła jawnego (średnio o $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), co można wiązać z rozpoczęciem sezonu grzewczego i ogrzewaniem budynków mieszkalnych, których brak w dzielnicy poprzemysłowej.

Zmienność strumieni turbulencyjnych ciepła utajonego Q_E również charakteryzowała się wyraźnym rytmem dobowym z maksimum w godzinach południowych i minimum w nocy. Wraz z obniżającą się temperaturą powietrza obniżała się również intensywność parowania, co spowodowało, że maksymalne wartości Q_E zmieniały się od $130 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w sierpniu do $\sim 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w październiku. W ciągu całej doby średni strumień Q_E miał charakter dodatni, co oznacza,

że nawet w nocy na badanych obszarach miasta nie dochodziło do kondensacji pary wodnej, co jest typowym zjawiskiem dla terenów zamiejskich (Offerle i in. 2006a; 2006b; Fortuniak, 2010). W odniesieniu do strumieni ciepła Q_H i Q_E nie opisano oddzielnie sektora LP EC3, ponieważ nie zaobserwowano różnic w ich zmienności, w porównaniu z pozostałymi obszarami otaczającymi stanowisko LP w dzielnicy przemysłowej.

Sektor południowo-wschodni na stanowisku w dzielnicy przemysłowej (ryc. 2) w przypadku strumieni gazów cieplarnianych potraktowano oddzielnie. Już wstępna analiza, polegająca na wyznaczeniu średnich wartości strumieni dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w zależności od kierunku wiatru ujawniła wyraźnie ich podwyższone wartości podczas napływu powietrza z sektora, w którym znajduje się elektrociepłownia EC3 (ryc. 4). Średni turbulencyjny strumień FCO_2 związany z funkcjonowaniem elektrociepłowni EC3 był 4–5 razy większy, a w wypadku FCH_4 około dwukrotnie większy, w porównaniu ze strumieniami zarejestrowanymi podczas napływu powietrza z innych sektorów z zabudową i użytkowaniem typowym dla dzielnicy przemysłowej.

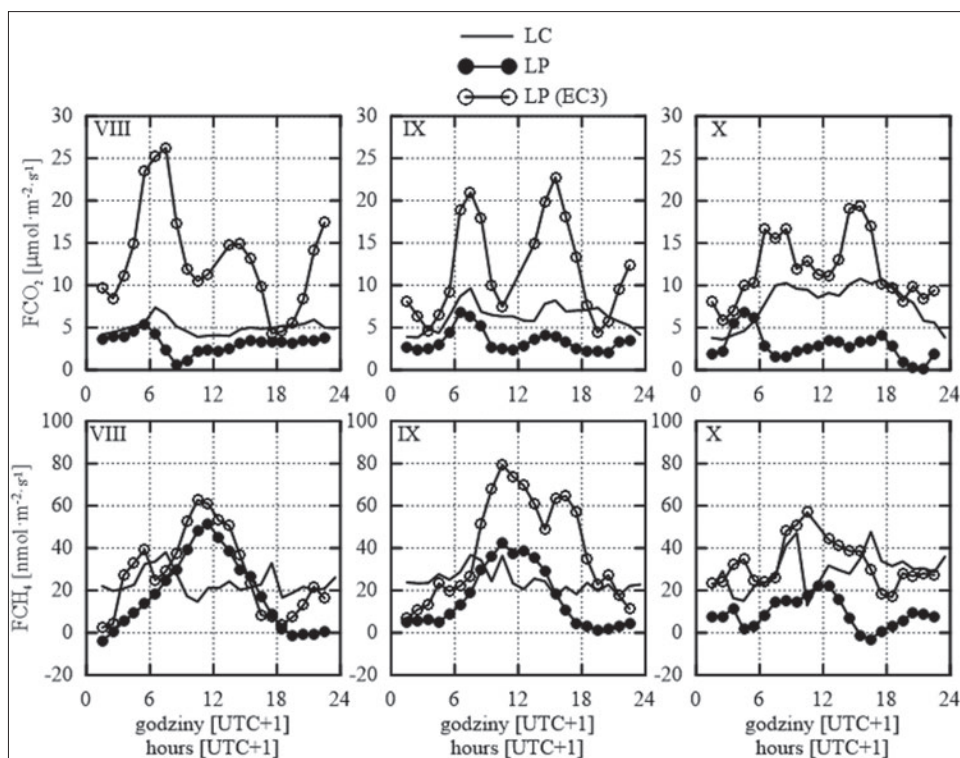


Ryc. 4. Średnie wartości turbulencyjnego strumienia dwutlenku węgla FCO_2 oraz metanu FCH_4 w odniesieniu do kierunku wiatru na stanowisku LP w Łodzi

Fig. 4. Average values of turbulent fluxes of carbon dioxide FCO_2 and methane FCH_4 in relation with wind direction in postindustrial district in Łódź

Średnia zmienność turbulencyjnych strumieni dwutlenku węgla i metanu w ciągu doby w badanych częściach miasta ma odmienny charakter w porównaniu ze strumieniami energii (ryc. 5). W przypadku strumienia FCO_2 niezależnie od stanowiska pomiarowego brak jest typowego dla strumieni Q_H i Q_E rytmu

z jednym maksimum w ciągu dnia i minimalnymi wartościami w nocy. W centrum we wrześniu i październiku obserwowano dwa maksima – poranne (między 6.00 a 8.00) oraz popołudniowo-wieczorne (między 15.00 a 22.00). Taka zmienność była rezultatem antropogenicznych emisji dwutlenku węgla podczas szczytów komunikacyjnych, po południu zaś i wieczorem dużą rolę odgrywała również aktywność gospodarstw domowych (ogrzewanie mieszkań, gotowanie itp.). W sierpniu taka zmienność modyfikowana była przez procesy biologiczne, co pewnym stopniu doprowadziło do zrównoważenia antropogenicznej emisji w ciągu dnia. Podobna zmienność dobowa turbulencyjnych strumieni dwutlenku węgla była również obserwowana w innych miastach świata (Nordbo i in. 2012; Christen 2014). Strumienie FCO_2 w kolejnych miesiącach niezależnie od pory roku były dodatnie i sięgały maksymalnie od $7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ w sierpniu do $11 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ w październiku. Strumienie FCO_2 w dzielnicy poprzemysłowej



Ryc. 5. Średnie dobowe przebiegi turbulencyjnych strumieni dwutlenku węgla FCO_2 oraz metanu FCH_4 w centrum Łodzi (LC) oraz w dzielnicy poprzemysłowej (LP i EC3) w sierpniu, wrześniu i październiku

Fig. 5. Mean daily courses of turbulent fluxes of carbon dioxide FCO_2 and methane FCH_4 in the center of Łódź (LC) and in the postindustrial district (LP and EC3) in September, October and November

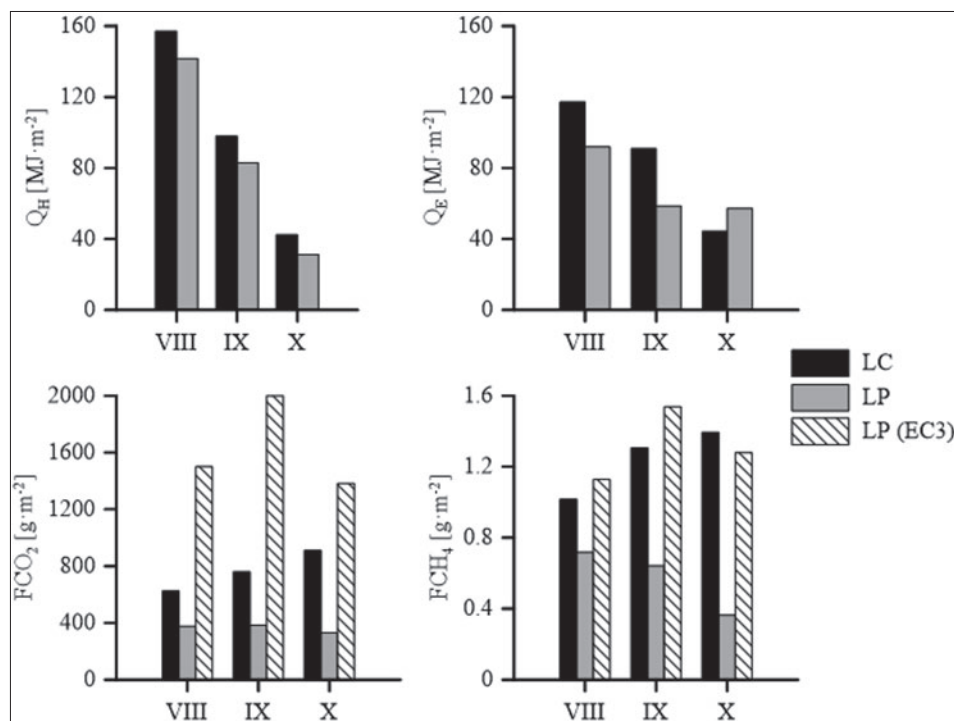
(z wyłączeniem strumieni związanych z elektrociepłownią EC3, ryc. 5) osiągały niższe wartości i we wszystkich badanych miesiącach nie przekraczały $8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Za przyczynę można uznać, zwłaszcza w sierpniu, większy udział powierzchni pokrytych roślinnością, dzięki czemu antropogeniczne emisje były w znacznym stopniu równoważone przez pobór dwutlenku węgla podczas fotosyntezy. W godzinach przedpołudniowych, w sierpniu, dzięki temu procesowi strumień FCO_2 spadał do niemal zera. Inną, równie ważną przyczyną jest mniej intensywny ruch samochodowy w otoczeniu stanowiska LP oraz znikome spalanie paliw kopalnych podczas gotowania i ogrzewania pomieszczeń (w dzielnicy przemysłowej brak jest budynków mieszkalnych, występują tylko zabudowania wykorzystywane gospodarczo jedynie w ciągu dnia).

Bardzo wysokie wartości strumieni zanotowano na stanowisku LP EC3 podczas napływu powietrza z sektora SE, wydzielonego ze względu na obecność elektrociepłowni EC3. Średnia dobowo zmienność strumieni FCO_2 w każdym z miesięcy charakteryzowała się występowaniem dwóch maksimum sięgających $26 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ w sierpniu, $22\text{--}23 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ we wrześniu i $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ w październiku. Duża zmienność wartości strumieni FCO_2 ciągu doby jest prawdopodobnie związana z rytmem pracy elektrociepłowni.

Zaobserwowane w sierpniu, wrześniu i październiku w centrum miasta strumienie metanu FCH_4 charakteryzowały się w większości mniej regularnym przebiegiem (ryc. 5). Średnio w ciągu całej doby osiągały one wartości dodatnie i charakteryzowały się występowaniem podwyższonych wartości w godzinach porannych i popołudniowo-wieczornych. Maksymalne wartości sięgały $40\text{--}50 \text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ i, podobnie jak w przypadku FCO_2 obserwowano je w godzinach szczytów komunikacyjnych oraz podczas popołudniowo-wieczornej aktywności gospodarstw domowych, kiedy podwyższona konsumpcja gazu ziemnego prowadziła do wycieków metanu do atmosfery. Podobnie nieregularną zmienność zaobserwowano również w Londynie, gdzie tak jak w Łodzi zrealizowano długoterminowe pomiary strumienia FCH_4 . Ze względu jednak na większą gęstość zabudowy w centrum Londynu, zmierzone strumienie osiągały kilkakrotnie wyższe wartości (Helfter i in. 2016). W dzielnicy przemysłowej zaobserwowano nieco inną zmienność dobową FCH_4 (ryc. 5). We wszystkich badanych miesiącach charakteryzowała się ona występowaniem jednego maksimum w godzinach południowych. Maksymalne wartości sięgały od 60 (sierpień) do 20 (październik) $\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. W przeciwieństwie do centrum miasta, w dzielnicy przemysłowej w nocy intensywność turbulencyjnej wymiany metanu malała i spadała niemal do zera. W centrum miasta ma miejsce całodobowa turbulencyjna dodatnia wymiana metanu, ze stałą emisją tego gazu, np. z sieci kanalizacyjnej, podczas gdy w dzielnicy przemysłowej emisja ta

prawdopodobnie ma miejsce tylko w dzień. Może być odzwierciedleniem faktu, iż jest to dzielnica pozbawiona budynków mieszkalnych, a hurtownie i sklepy funkcjonują jedynie w dzień. Podwyższone wartości strumienia FCH_4 były obserwowane podczas napływu powietrza z sektora, w którym zlokalizowana jest elektrociepłownia EC3. Maksymalne wartości turbulencyjnej wymiany metanu sięgały średnio 60, 80 i 60 $nmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, odpowiednio w sierpniu, wrześniu i październiku.

Opisane powyżej dobowe przebiegi turbulencyjnych strumieni energii masy posłużyły do wyznaczenia średnich wartości miesięcznej wymiany ciepła jawnego i utajonego oraz gazów cieplarnianych (ryc. 6). Miesięczne strumienie ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E w centrum Łodzi malały wraz z końcem lata i nastaniem jesieni od około 160 $MJ \cdot m^{-2}$ do 40 $MJ \cdot m^{-2}$. W dzielnicy poprzemysłowej zmienność była podobna z tym, że miesięczna wymiana ciepła była



Ryc. 6. Miesięczna turbulencyjna wymiana ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w centrum Łodzi (LC) oraz w dzielnicy poprzemysłowej (LP i EC3) w sierpniu, wrześniu i październiku

Fig. 6. Monthly turbulent exchange of sensible heat Q_H , latent heat Q_E , carbon dioxide FCO_2 and methane FCH_4 in the center of Łódź (LC) and in the postindustrial district (LP and EC3) in September, October and November

niższa o 10 do 30 MJ·m⁻². Jedyne w październiku miesięczny strumień ciepła utajonego Q_E był o około 15 MJ·m⁻² wyższy w porównaniu z centrum miasta. Przyczyna takiego zróżnicowanie strumieni tkwi, jak to już wcześniej wspomniano, w odmiennym typie zabudowy i znana jest również z kampanii pomiarowych prowadzonych w innych miastach (np. Kotthaus, Grimmond, 2014a, 2014b).

Dużo większe różnice zaobserwowano w miesięcznej wymianie gazów cieplarnianych na obu stanowiskach. W centrum miasta w okresie od sierpnia do października zaobserwowano wyraźny wzrost turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla, jak i metanu (ryc. 6). W tym czasie miesięczne FCO_2 wzrosło z 600 g·m⁻² w sierpniu do 900 g·m⁻² w październiku, a FCH_4 od 1,0 do 1,4 g·m⁻². W dzielnicy przemysłowej w tych samych miesiącach wymiana spadała, przy czym w wypadku FCO_2 było to nieznaczne obniżenie z 380 na 330 g·m⁻², a w wypadku FCH_4 był to wyraźny, około dwukrotny spadek z 0,7 na 0,35 g·m⁻². Obniżone w stosunku do centrum miasta wartości strumieni miesięcznych po raz kolejny potwierdzają wpływ sposobu użytkowania terenu w dzielnicy przemysłowej, a konkretnie braku budynków mieszkalnych oraz mniej intensywnemu ruchowi samochodowemu. Podwyższone wartości strumieni gazów cieplarnianych na stanowisku LP obserwuje się w sytuacji napływu powietrza znanego z elektrociepłowni EC3. Turbulencyjna wymiana metanu jest wówczas podobnie intensywna jak w centrum miasta, a wypadku dwutlenku węgla nawet kilkakrotnie większa.

PODSUMOWANIE

W pracy opisano wyniki pomiarów turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego i utajonego oraz gazów cieplarnianych (dwutlenek węgla i metan) przeprowadzonych w okresie sierpień–październik 2016 roku w dzielnicy przemysłowej w Łodzi, na tle wyników podobnych pomiarów prowadzonych w tych samych miesiącach w latach 2013–2015 w centrum miasta. Wyniki pomiarów potwierdziły, iż typ zabudowy oraz udział powierzchni sztucznych w stosunku do udziału terenów pokrytych roślinnością to bardzo ważne determinanty intensywności wymiany turbulencyjnej energii i masy pomiędzy powierzchnią miasta a atmosferą. Podobne zależności uzyskano podczas kilku kampanii pomiarowych prowadzonych w innych miastach świata (Offerle i in. 2006a, 2006b; Nordbo i in. 2012; Christen 2014; Kotthaus, Grimmond 2014a, 2014b; Helfter i in., 2016). W centrum Łodzi zaobserwowano relatywnie wysokie strumienie ciepła oraz gazów cieplarnianych, które miały mniej (Q_H , Q_E) lub bardziej (FCO_2 , FCH_4) wyraźnie obniżone wartości w dzielnicy o mniejszym odsetku powierzchni sztucznych, bez kanionów ulicznych oraz budynków mieszkalnych. Wydzielony przypadek

elektrociepłowni, której działalności towarzyszą emisje gazów cieplarnianych rejestrowane na stanowisku LP (EC3) w dzielnicy przemysłowej, pokazuje, że w badaniach tego typu nie należy pomijać istnienia tzw. źródeł lokalnych. Zgodnie z założeniami metody kowariancji wirów stanowiska pomiarowe strumieni turbulencyjnych instaluje się w miejscach o jak najbardziej homogenicznej zabudowie. Rezultatem są uśrednione wartości strumieni reprezentatywne dla typowych dzielnic miejskich (np. centrum, dzielnica domów jednorodzinnych, handlowa, itd.). Wyniki ze stanowiska LP EC3 pokazują jednak, że pomijanie takich miejsc może prowadzić do zaniżenia oceny intensywności wymiany gazów cieplarnianych w skali całego miasta.

Zmienność strumieni turbulencyjnych energii i masy zarejestrowane w Łodzi dobrze wpisują się w dostępną wiedzę dotyczącą problemu turbulencyjnej wymiany na terenach zurbanizowanych. Podobnie jak w innych centrach miast obserwuje się tu relatywnie wysokie wartości strumieni ciepła jawnego oraz podwójne maksima w ciągu doby w wypadku strumieni gazów cieplarnianych (Offerle i in. 2006a, 2006b; Nordbo i in. 2012; Christen 2014; Kotthaus, Grimmond 2014a, 2014b). Na podstawie danych z kilkunastu miast świata (również z Łodzi) potwierdzono, że w dzielnicach o podwyższonym udziale powierzchni pokrytych roślinnością maleją strumienie ciepła jawnego oraz dwutlenku węgla, a strumienie ciepła utajonego rosną. Ze względu na niewielką liczbę kampanii pomiarowych dotyczących strumienia metanu w miastach taka zależność wciąż czeka na potwierdzenie (Nicolini i in. 2013, Christen 2014; Helfter i in. 2016). Z dotychczas opublikowanych prac wynika, iż taka zależność istnieje, np. w centrum Łodzi strumienie metanu są wyraźnie niższe niż w gęściej zabudowanym centrum Londynu. Prawdopodobnie jednak lepszą zmienną charakteryzującą przestrzenną zmienność strumienia metanu w mieście może być gęstość zaludnienia, której, w różnych dzielnicach, towarzyszy inna gęstość infrastruktury będącej potencjalnym źródłem metanu (gazociągi, sieci kanalizacyjne, ulice z ruchem samochodowym o różnym natężeniu itd.)

Praca finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2011–2016 jako projekt badawczy (grant MNiSzW nr 2011/01/D/ST10/07419). Autor pracy pragnie podziękować Komendantowi Miejskiemu Państwowej Straży Pożarnej w Łodzi oraz Komendantowi Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej nr 10 w Łodzi za umożliwienie prowadzenia pomiarów.

LITERATURA

- Aubinet M., Vesala T., Papale D., 2012: *Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, Springer.
- 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.
- Foken T., 2008: *Micrometeorology*, Springer, Berlin.
- Fortuniak K., 2003: *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*, Wydawnictwo UŁ.
- Fortuniak K., 2010: *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*, Wydawnictwo UŁ.
- 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.
- 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.
- Heeb N.V., Forss A.M., Saxer C.J., Wilhelm P., 2003: *Methane, benzene and alkyl benzene cold start emission data of gasoline-driven passenger cars representing the vehicle technology of the last two decades*, *Atmospheric Environment*, 37, 5185–5195.
- Helfter C., Tremper A.H., Halios C.H., Kotthaus S., Bjorkegren A., Grimmond C.S.B., Barlow J.F., Nemitz E., 2016: *Spatial and temporal variability I of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 10543–10557.
- Kłysik K., 1998: *Charakterystyka powierzchni miejskiej Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia*, *Acta Universitatis Lodzianensis, 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.
- LI-7700 Open Path CH₄ Analyzer. *Instruction Manual*, Li-cor Biosciences, www.licor.com.
- Nam E.K., Jensen T.E., Wallington T.J., 2004: *Methane emissions from vehicles*, *Environmental Science & Technology*, 38, 2005–2010.
- Nicolini G., Castaldi S., Fratini G., Valentini R., 2013: *A literature overview of micrometeorological CH₄ and N₂O 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 CO₂ emissions from cities*, Geophysical Research Letters, 39, DOI:10.1029/2012GL053087.
- 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.
- 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., 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., Zieliński M., 2016: *Urban-Wetland contrast in turbulent exchange of methane*, Atmospheric Environment, 145, 176–191.
- Schmid, H.P., 1994: *Source areas for scalar and scalar fluxes*, Boundary Layer Meteorology, 67, 293–318.
- 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

This paper contains the results of measurement of turbulent exchange of heat and mass in Łódź in the period 2013–2016. Measurement campaigns of sensible (Q_H) and latent (Q_E) heat fluxes as well as carbon dioxide and methane (FCO_2 and FCH_4) fluxes have been carried out on two urban sites characterized by different development and use. The first site has been located at the city center (artificial surfaces percentage ~60%) dominated by the net of urban canyons and 3–4 storey tenement buildings. The second site has been located at postindustrial district about 4.8 km to the north. This part of the city is characterized by lower development density (~40%) and dominated by big postindustrial buildings converted into warehouses and large stores. Turbulent fluxes Q_H , Q_E , FCO_2 , and FCH_4 have been measured with eddy covariance technique. Both sites have been equipped with typical instrumentation set consisting of ultrasonic anemometers and water vapor, carbon dioxide and methane gas analyzers. According to eddy-covariance method principles, on both sites instruments have been mounted on the height double or more higher than mean surrounding urban canopy layer. The aim of this paper was to show variability of heat and mass fluxes registered during August, September and October 2016 in the postindustrial district and compare with the results obtained during the same months in the center of Łódź in the years 2013–2015.

The results show that intensity of turbulent exchange is clearly related to land use and characteristics of urban surface. Turbulent exchange of sensible and latent heat on postindustrial area, covered by big buildings and wide market places has been smaller than in the center of Łódź,

dominated by urban canyons and residential buildings. Moreover, turbulent fluxes of greenhouse gases have been also smaller especially in the case of carbon dioxide. Diurnal courses of FCO_2 and FCH_4 fluxes registered at the city center have been dominated by two maxima, related to diurnal rhythm of fossil fuel combustion during traffic rush hours and evening inhabitants activities (cooking, heating tec.). While traffic is much less intense in comparison with city center and there is a lack of residential buildings on postindustrial areas, carbon dioxide fluxes are much smaller there and methane fluxes have only one maximum a day.