

## MIĘDZYDOBOWA ZMIENNOŚĆ PAROWANIA TERENOWEGO W OBSZARACH ZURBANIZOWANYCH I RÓŻNYCH TYPAH ROŚLINNOŚCI PARANATURALNEJ

### Interdiurnal variability of evapotranspiration in urban areas and different types of vegetation backgrounds

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

**Zarys treści.** W pracy zaprezentowano porównanie parowania terenowego w obszarach miejskich z wynikami pomiarów w terenach rolniczych i bagiennych. W tym celu wykorzystano pomiary kowariancyjne wykonane na trzech stacjach: w Łodzi (stacja miejska), w miejscowości Annosław (obszar rolniczy) i na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego (tereny bagiennie). Analiza obejmowała pomiary z lat 2013–2014. Przeprowadzone badania potwierdziły, że parowanie terenowe w obszarach zurbanizowanych jest niższe w stosunku do pomiarów na terenach rolniczych i bagiennych. Na przykład średnie sumy godzinne (w godzinach południowych) w miesiącach wiosennych i letnich zawierały się w przedziale 0,15–0,20 mm/h. Na stacjach zamiejskich wartości te były wyższe i osiągały poziom 0,25–0,30 mm/h. Jednakże analiza przebiegów dobowych w wybranych okresach pokazała, że o ile w okresie wiosennym w warunkach zamiejskich strumień pary wodnej znacznie przewyższa wartości odnotowane w mieście, to w drugiej połowie lata (po zniwach) i jesienią uzyskane wyniki osiągają zbliżone wartości.

**Słowa kluczowe:** ewapotranspiracja, metoda kowariancji wirów, klimat miasta

**Abstract.** The main objective of this work is a comparison of urban evapotranspiration with the measurement of evapotranspiration on agricultural fields and wetland area. The results are taken from three eddy covariance measurement station located: in Łódź (urban station), in the Annosław village (agriculture area) and in Biebrza National Park (wetland area). The analyses cover a two-year measurement period (2013–2014). The investigation has confirmed that the urban evapotranspiration is lower than the one observed on agricultural and wetland areas. For example, from April to August, the urban evapotranspiration is characterized by a distinct diurnal pattern with the highest average values (around noon) at a level of ca. 0.15 to 0.20 mm/h. At the wetland and agricultural stations these values were higher and reached the level of 0.25–0.30 mm/h. However, the analysis of the daily course of evapotranspiration during the selected periods shows that during the second part of summer (after harvesting) and autumn, urban evapotranspiration is close to the level found in agricultural field evapotranspiration.

**Key words:** evapotranspiration, eddy covariance methods, urban climate

## Wprowadzenie

Jedną z cech klimatu miasta, oprócz szeroko opisanej miejskiej wyspy ciepła, jest odmienne (mniejsze) w porównaniu z obszarami pozamiejskimi tempo parowania terenowego. Znaczny odsetek powierzchni sztucznych, cechujących się zerową wilgotnością i niewielką powierzchnią terenów zielonych, powodują zmniejszenie strumienia pary wodnej nad powierzchnią zurbanizowaną. Dodatkowo wysokie wartości strumienia

wartości strumienia ciepła utajonego) skutkują mniejszą częstością występowania zjawiska rosy ciepła jawnego przez całą dobę (przewyższające w mieście (Taha 1997; Fortuniak i in. 2006; Fortuniak 2010; Grimmond i in. 2010). W badaniach nad parowaniem z terenów zurbanizowanych można wyróżnić dwa główne nurty. W pierwszym, badania oparte głównie o metodę kowariancji wirów, skupiają się na ocenie zmienności w różnych skalach przestrzennych strumienia ciepła utajonego  $Q_e$  na tle pozostałych składników bilansu ciepł-

\* Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl

\*\* Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Instytut Geografii, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków

nego (Grimmond, Oke 1991; Weber, Kuttler 2005; Fortuniak i in. 2008, 2012; Loridan, Grimmond 2012; Ward i in. 2013; Järvi i in. 2014; Kotthaus, Grimmond 2014a; Kotthaus, Grimmond 2014b). Wyniki tych badań potwierdzają niższe wartości  $Q_e$  w stosunku do wartości ciepła jawnego, a średnie wartości stosunku Bowena  $\beta$  zawierają się w przedziale 2–6 (np. Taha 1997; Grimmond, Oke 1991, 1998; Fortuniak i in. 2006; Kotthaus, Grimmond 2014a).

Drugi nurt badań z zakresu oceny ewapotranspiracji w terenach zurbanizowanych podejmuje się oceny tego parametru w przypadku parków miejskich czy też tzw. zielonych dachów (Marasco i in. 2014, 2015) lub różnych typów powierzchni, jak chodniki, ulice, parkingi (np. Andersen i in. 1999; Göbel i in. 2008; Brown, Borst 2015). Wyniki badań mają istotne znaczenie z punktu widzenia oceny bilansu wodnego tzw. zlewni miejskiej, określenia zapotrzebowania na wodę miejskich terenów zielonych czy funkcjonowania sieci kanalizacyjnej (szczególnie w przypadku opadów nawałnych).

Podstawowym celem opracowania jest porównanie wielkości parowania terenowego z powierzchni miejskiej z wynikami pomiarów prowadzonych na terenach rolniczych i obszarach bagiennych. Analizie poddano przebiegi dobowe parowania terenowego na tle określonych warunków pogodowych. Zaprezentowano kilkudniowe okresy z wiosny, lata i jesieni, pozwalające na ukazanie różnic w parowaniu terenowym w różnych warunkach pogodowych, a także różnych fazach rozwoju upraw rolniczych i roślinności bagiennej. Dzięki równoległym pomiarom na stacji miejskiej i dwóch stacjach zamiejskich, z wykorzystaniem tej samej procedury pomiarowej, zaistniała możliwość ukazania (oprócz podstawowych statystyk) dynamiki parowania terenowego w różnych typach środowiska. W większości cytowanych powyżej badań z zakresu charakterystyki strumienia ciepła utajonego w terenach zurbanizowanych prezentowane są wyniki z pomiarów głównie miejskich, bez porównań do pomiarów ze stacji pozamiejskich. Natomiast najlepszym podejściem w charakterystyce klimatu terenów zurbanizowanych są badania porównawcze równoległych pomiarów na stacjach miejskich i zamiejskich.

## Metoda

W opracowaniu wykorzystano wyniki pomiarów turbulencyjnego strumienia pary wodnej przeprowadzonych na trzech stanowiskach pomiaro-

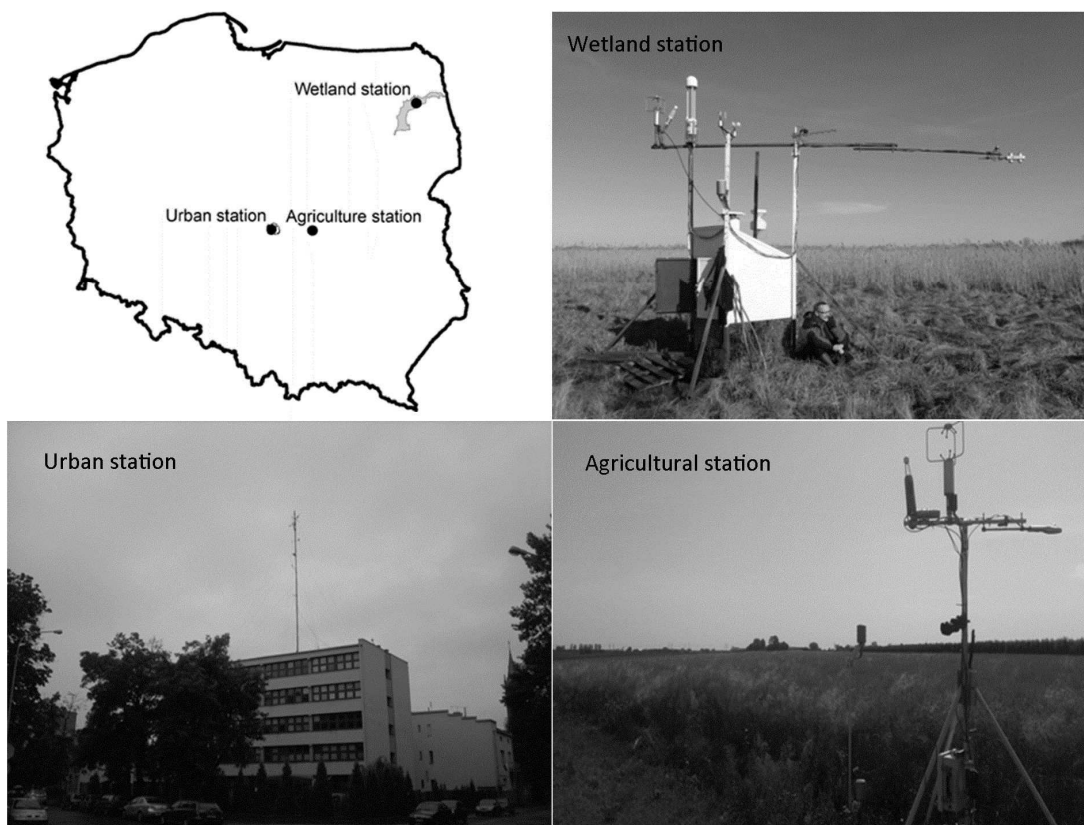
wych (rys. 1). Pierwsza stacja, reprezentująca warunki miejskie, zlokalizowana jest w zachodniej części ścisłego centrum Łodzi przy ulicy Lipowej (51°45'45"N; 19°26'43"E). Przyrządy pomiarowe zamontowano na maszcie na wysokości około 37 m nad gruntem, tj. około 25 m nad średnią wysokością budynków. Takie umieszczenie przyrządów pozwala przypuszczać, że znajdują się one w warstwie powierzchniowej ponad górną granicą warstwy tarcia. W najbliższym otoczeniu dominuje zwarta zabudowa miejska z przewagą trzy- i czterokondygnacyjnych budynków, a odsetek powierzchni zielonych nie przekracza 40%.

Druga stacja pomiarowa reprezentuje warunki obszarów rolniczych charakterystyczne dla centralnej Polski. Pomiary przeprowadzono w miejscowości Annosław (woj. łódzkie), położonej w centralnej Polsce, około 65 km na wschód od Łodzi (51°45'1.04"N; 20°25'3.22"E; 165 m n.p.m.). Przyrządy pomiarowe zostały zamontowane na maszcie na wysokości 3,1 m nad gruntem. W analizowanym okresie w najbliższym otoczeniu stacji pomiarowej dominowały uprawy pszenicy, mieszanki zbożowej, ziemniaków, truskawek i malin.

Trzecia stacja pomiarowa zlokalizowana jest w środowisku bagiennym, na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego (BPN), w sąsiedztwie miejscowości Kopytkowo (53°35'20"N; 22°53'31"E). Tereny te stanowią największy kompleks bagien i torfowisk zwanych „Czerwone Bagno”. W bezpośrednim otoczeniu punktu pomiarowego (~ 500 m) występują formacje szuwarowe z dominującym szuwarem mannowym (*Glycerietum maxime*) i szuwarem trzcinowym (*Phragmitetum communis*), a także formacje mszystozurczycowe reprezentowane przez zespół *Carici canescen-Agrostietum caninae*. Są to zbiorowiska szeroko występujące w dolinie biebrzańskiej (Matuszkiewicz 2004).

Na wszystkich trzech stacjach zestaw przyrządów pomiarowych wykorzystywany w metodzie kowariancyjnej obejmował: anemometr soniczny (RMYoung 81000, USA), umożliwiający pomiar trzech składowych prędkości wiatru i analizator gazowy (LI7500, LI-COR, Inc., Lincoln, USA), pozwalający na określenie fluktuacji zawartości pary wodnej. Dane rejestrowane były z częstotliwością 10 Hz. Składniki bilansu radiacyjnego zmierzono z wykorzystaniem bilansomierza CNR1 (Kipp&Zonen, Holandia).

Wyniki pomiarów z zastosowaniem wyżej opisanych przyrządów posłużyły do wyznaczenia strumienia pary wodnej z zastosowaniem metody kowariancyjnej. W obliczeniach przyjęto



Rys. 1. Lokalizacja stacji pomiarowych

The location of measurement stations

tradycyjne uśrednianie Reynoldsa w przedziałach godzinnych, ponadto zastosowano standardowe kroki weryfikacji danych, takie jak: eliminacja sztucznych impulsów elektrycznych, obroty układów współrzędnych, korekcje ze względu na temperaturę i wilgotność powietrza, poprawkę WPL (Webb i in. 1980) oraz poprawki na straty spektralne (Fortuniak 2010). Kolejnym krokiem zastosowanym w procesie przygotowania danych była weryfikacja postulatu o stacjonarności szeregu (Foken 2008; Fortuniak 2010). Zagadnienie to zostało rozwiązane z wykorzystaniem trzech testów: Fokena (Foken 2008), Mahrta (Mahrt 1998) i Dutaura, z modyfikacjami Affre (Dutaur i in. 1999; Affre i in. 2000). Ponadto dokonano weryfikacji danych pod kątem opadów atmosferycznych i warunków wystąpienia oszronienia przyrządów i pominięto je w dalszej analizie.

Do charakterystyki porównawczej terenów zurbanizowanych i obszarów rolniczych wykorzystano wyniki ciągłych pomiarów z okresu od 1 stycznia 2013 roku do 31 grudnia 2014 roku (w przypadku stacji Lipowa i Annosław). Natomiast prezentowane wyniki ewapotranspiracji obszarów bagiennych oparte były na pomiarach

z okresu od 1 czerwca 2013 roku do 31 grudnia 2014 roku. Zastosowane procedury weryfikacji danych, jak i problemy z zasilaniem elektrycznym powodowały, że otrzymane serie pomiarowe cechowały się lukami pomiarowymi, co miało wpływ na wyznaczenie sum dobowych czy miesięcznych ewapotranspiracji. Dlatego w przypadku charakterystyki dobowej parowania terenowego zastosowano procedurę uzupełniania danych pomiarowych o tzw. metodę średniego dobowego przebiegu. Natomiast analiza zmienności międzydobowej parowania terenowego w wybranych przypadkach opierała się na danych surowych, bez zastosowanej procedury wypełniania luk pomiarowych.

## Wyniki

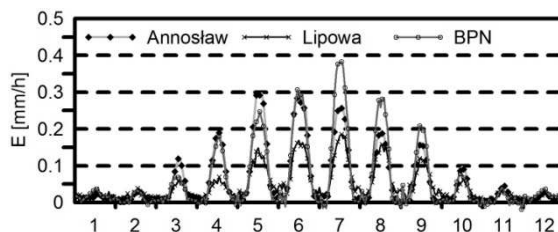
Porównanie parowania terenowego z trzech analizowanych stacji potwierdziło niższe wartości parowania terenowego w obszarach zurbanizowanych. Największe różnice zaznaczyły się w cieplej porze roku. Analiza średnich dobowych przebiegów wskazała znacznie niższe wartości, szczególnie w godzinach południowych

(rys. 2). W mieście, w godzinach południowych, średnie wartości wahały się od około 0,15 mm/h (w maju) do około 0,20 mm/h (w lipcu). W tym samym okresie w obszarze zamiejskim, na terenach rolniczych, osiągnęły one poziom 0,30 mm/h w maju i czerwcu i około 0,25 mm/h w lipcu. Jeszcze wyższe wartości otrzymywano w przypadku oceny parowania terenowego w obszarach bagiennych. O ile w maju i czerwcu w godzinach południowych były one zbliżone do tych z pola uprawnego, to w lipcu i sierpniu wyniosły odpowiednio około 0,40 mm/h i 0,30 mm/h (rys. 2).

W sezonie zimowym, zarówno w mieście, jak i na stacjach zamiejskich, praktycznie nie wykryto wyraźnego rytmu dobowego, a otrzymane wartości były bardzo niskie (rys. 2).

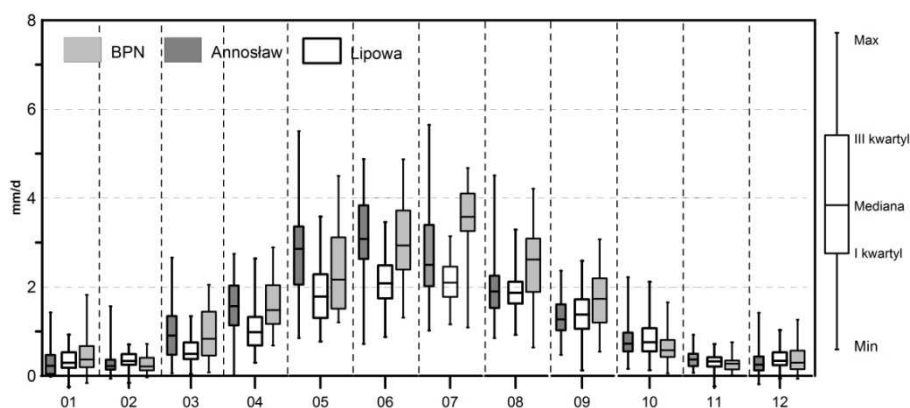
Obniżony turbulencyjny strumień pary wodnej w terenach miejskich skutkowało niskimi wartościami sum dobowych parowania terenowego – szczególnie w ciepłej połowie roku (rys. 3). Należy zauważyć, że parowanie terenowe w mieście

(w porównaniu do wyników na stacjach zamiejskich) cechuje się dość dużą stabilnością tego procesu. Po pierwsze mediana wartości dobowych (w okresie od maja do sierpnia) zmienia się w przedziale 1,8–2,2 mm/d. Po drugie – odstęp międzykwartylowy sum dobowych jest niewielki i waha się od 0,50 mm/d w sierpniu do 0,90 mm/d w maju.



Rys. 2. Średni przebieg dobowy parowania terenowego na analizowanych stacjach

Mean daily course of evapotranspiration at analysed stations



Rys. 3. Podstawowe statystyki sum dobowych parowania terenowego

The basic statistics of daily sums of evapotranspiration

Na obu stacjach pozamiejskich otrzymywane wartości dobowe parowania przewyższyły te ze stacji miejskiej. Z uwagi na fakt, że ewapotranspiracja w znacznej mierze zależy od stanu wegetacji, na obu stacjach zamiejskich charakterystyczne są pewne różnice w dynamice tego procesu. W okresie wiosennym (szczególnie w maju i czerwcu) najwyższym parowaniem terenowym cechowały się tereny rolnicze, kiedy to wartość mediany sum dobowych wyniosła 3 mm/d. W okresie letnim (szczególnie w okresie dojrzewania i zbioru zbóż) parowanie terenowe nad polem uprawnym ulegało obniżeniu. Wartość mediany sum dobowych wyniosła 2,5 i 1,8 mm/d odpowiednio w lipcu i sierpniu, co więcej – w drugiej połowie lata otrzymane

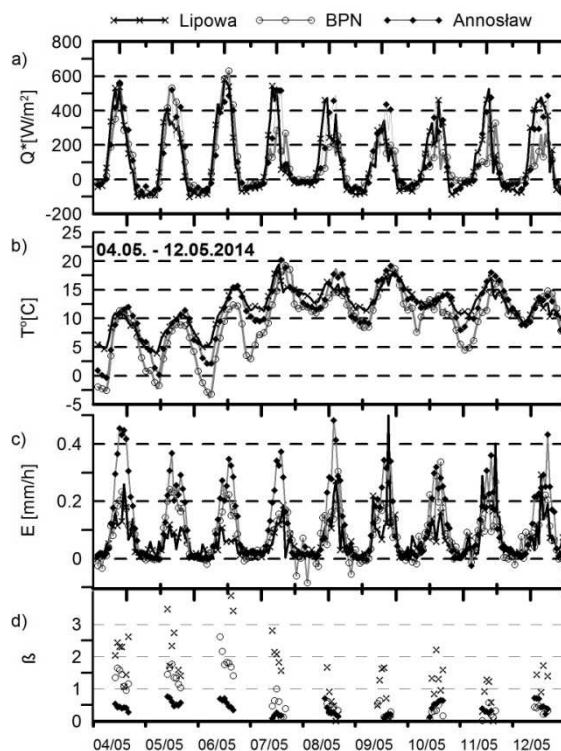
wartości dobowe zrównały się z tymi z obszaru zurbanizowanego (rys. 3).

W obszarach bagiennych, w sezonie wiosennym, ewapotranspiracja była niższa w porównaniu z polem uprawnym, z wartością mediany na poziomie 2,2 mm/d (w maju) i 2,8 mm/d w czerwcu. Natomiast w okresie letnim, w warunkach wysokiej temperatury powietrza i przy w pełni rozwiniętej szacie roślinnej, wartości mediany wyniosły odpowiednio 3,5 mm/d w lipcu i 3 mm/d w sierpniu, czym znacznie przewyższyły wartości z miasta i pola uprawnego (rys. 3).

Otrzymane wartości sum dobowych parowania terenowego na stacjach zamiejskich cechują się również większą zmiennością w stosunku do terenów zurbanizowanych. Potwierdza to różnica

między trzecim a pierwszym kwartyłem wartości dobowych, która wielokrotnie wynosi powyżej 1 mm/24 h.

W kolejnym kroku badawczym zaprezentowano zmienność przebiegu dobowego parowania terenowego poszczególnych stacji w różnych porach roku i w odmiennych fazach rozwoju roślinności. Pierwszy wybrany okres (4–12 maja) przedstawia zmienność dobową parowania w warunkach wiosennych, przy jednoczesnej zmianie warunków meteorologicznych związanych z adwekcją mas powietrza polarnomorskiego i wystąpieniem opadów (rys. 4). Dni 4–6 maja to warunki pogody wyżowej słonecznej, z małym zachmurzeniem (rys. 4a). Nad Polską występowały masy powietrza arktycznego, charakteryzujące się niską temperaturą powietrza. W godzinach południowych temperatura osiągała 10–12°C, natomiast w nocy na terenie BPN odnotowano temperaturę ujemną (rys. 4b). W takich warunkach najwyższym parowaniem cechowały się tereny rolnicze, gdzie w godzinach południowych notowano wartości z przedziału 0,3–0,4 mm/h. W tym czasie w warunkach miejskich parowanie terenowe było znacznie niższe i wynosiło około 0,1 mm/h. W kolejnych dniach nastąpiła istotna zmiana warunków pogodowych. Wraz z napłynięciem powietrza polarno-morskiego wzrosła temperatura powietrza, przy jednoczesnym nasileniu zachmurzenia i niższych wartościach bilansu radiacyjnego. Jest to również okres z wystąpieniem opadów atmosferycznych. Zmiana warunków pogodowych wpłynęła na zmiany intensywności parowania, odmienne w zależności od charakteru środowiska. I tak np. w warunkach pola uprawnego zaobserwowano niewielką zmianę wielkości parowania terenowego. Podobnie jak w pierwszych dniach opisywanego okresu, sumy godzinne parowania terenowego w południe oscylowały wokół wartości 0,3 mm/h. Natomiast silniejszy wzrost charakterystyczny był dla obszarów zurbanizowanych i terenów podmokłych. Wyższa temperatura powietrza (przy dość zbliżonych wartościach bilansu radiacyjnego na poszczególnych stacjach) prowadziła do wzrostu parowania w terenach bagiennych, a w godzinach południowych uzyskiwane wartości zbliżyły się do tych pomierzonych nad polem uprawnym. W mieście występujące opady atmosferyczne skutkowały dość dużą zmiennością parowania terenowego z dnia na dzień. W czasie opadów (np. 9 i 11 maja) wartości godzinne parowania terenowego przekroczyły 0,2 mm/h, natomiast już w kolejnym dniu (bez opadów) – były zbliżone do zanotowanych przed adwekcją mas powietrza polarnego. Dodatkowo



Rys. 4. Przebieg dobowy parowania terenowego (E) w okresie od 04.05.2014 do 12.05.2014 roku na tle wybranych parametrów meteorologicznych

Q\* – bilans radiacyjny, T – temperatura powietrza, β – stosunek Bowena

The course of evapotranspiration (E) during the period from 04.05.2014 to 12.05.2014 with the selected meteorological characteristics

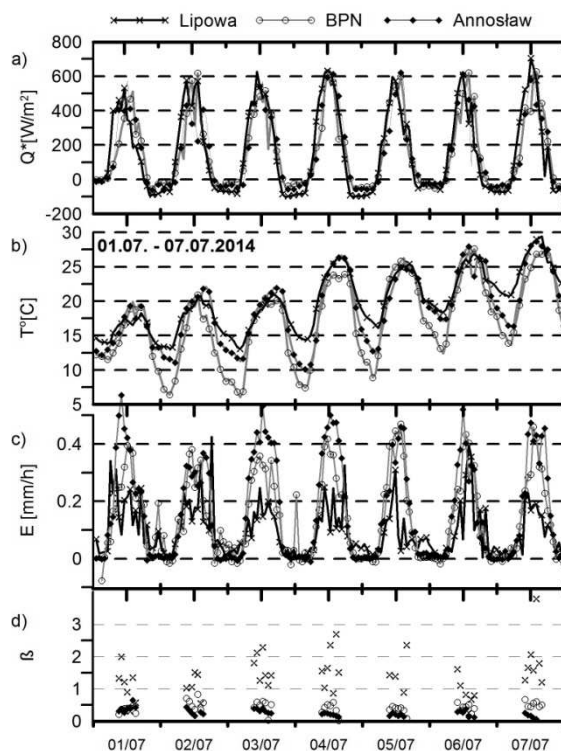
Q\* – net radiation, T – air temperature, β –Bowen ratio

w warunkach miejskich i na obszarach bagiennych wystąpienie opadów powodowało wzrost ewapotranspiracji, przy jednoczesnym zmniejszeniu wartości strumienia ciepła jawnego. W mieście wartości stosunku Bowena na początku analizowanego okresu wzrastały od poziomu 2 do 4, natomiast w dniach z opadem atmosferycznym od poziomu 1 do 2 (rys. 4d). Natomiast w obszarach bagiennych w okresie opadów atmosferycznych strumień ciepła utajonego przewyższał wartości ciepła jawnego. W warunkach klimatu pola uprawnego, wiosną, wystąpienie opadów atmosferycznych nie wpływało zauważalnie na stosunek ciepła jawnego i utajonego. Zarówno na początku analizowanego okresu, jak i po adwekcji powietrza polarnomorskiego, wartości stosunku Bowena wahały się w przedziale 0–1 (rys. 4d).

Kolejny okres, od 1 do 7 lipca 2014 roku, przedstawia międziodobową zmienność parowania terenowego w okresie letnim. W wybranym okresie panował układ wyżowy, przynoszący pogodę bezchmurną w ciągu całego dnia, co skutkowało

wysokimi wartościami bilansu radiacyjnego (rys. 5a), a także systematycznym wzrostem temperatury powietrza (20–30°C w godzinach południowych). To również okres najwyższego wzrostu roślinności na stacjach zamiejskich. W takich warunkach najwyższym parowaniem terenowym charakteryzował się obszar rolniczy. W godzinach południowych osiągane wartości przekraczały 0,4 mm/h (rys. 5c), a strumień ciepła utajonego ponad dwukrotnie przewyższał wartości strumienia ciepła jawnego (rys. 5d). Na stacji miejskiej i w terenie bagiennym wartości parowania terenowego były niższe (rys. 5c), przy czym w przypadku parowania terenowego z roślinności bagiennej strumień ciepła utajonego (podobnie jak na polu uprawnym) znacznie przewyższał strumień ciepła jawnego. W godzinach południowych wartości stosunku Bowena również były niższe od 1 (rys. 5d). Natomiast w warunkach miejskich wartości  $\beta$  przekraczały wartość 1, co potwierdza tezę o osłabieniu ewapotranspiracji poprzez niski odsetek powierzchni zielonych i przekształceniu, w głównej mierze, energii słonecznej w strumień ciepła jawnego i ogrzewaniu atmosfery nad miastem. Dodatkowo zaznaczyła się różnica w charakterze przebiegu dobowego pomiędzy stacją miejską i stacjami zamiejskimi. O ile przebieg dobowy sum godzinnych parowania terenowego na stacji w Annosławiu i w BPN miał wyraźny sinusoidalny charakter, ściśle związany z przebiegiem natężenia promieniowania słonecznego i bilansu radiacyjnego w dni słoneczne, to w warunkach miejskich, w godzinach południowych, sumy godzinne cechowały się większą zmiennością.

Zupełnie odmienna relacja przebiegu dobowego parowania terenowego pomiędzy stacją miejską i stacjami zamiejskimi zaznaczyła się w drugiej połowie lata. W przedstawionym okresie od 26 do 30 lipca 2014 roku wartości otrzymane z pomiarów na stacji miejskiej i na terenie rolniczym zrównały się. Na obu stacjach, w podobnych warunkach pogodowych w ciągu dnia (rys. 6a, b), uzyskiwane wartości oscylowały na poziomie około 0,2 mm/h (rys. 6c). Zmiany w fazie rozwoju wegetacyjnego roślin uprawnych (dojrzewanie zbóż), jak i prace polowe (żniwa, zabiegi późniwne) skutkowały tym, że strumień ciepła utajonego był znacznie niższy. Po żniwach wartości stosunku Bowena (podobnie jak w mieście) przekroczyły wartość 1. Natomiast maksymalny rozwój roślinności bagiennej i wysokie uwilgotnienie powodowały, że w drugiej połowie lata parowanie terenowe terenów bagiennych było najwyższe (w godzinach okołopołudniowych na poziomie 0,4 mm/h).



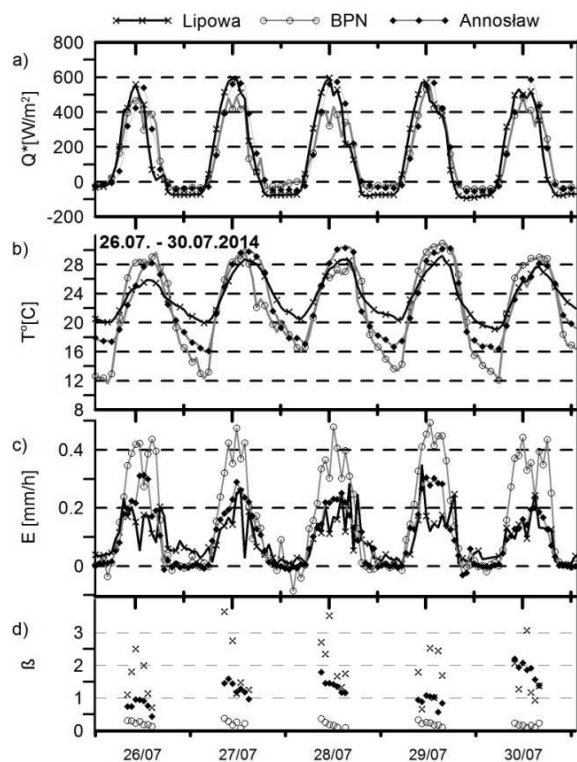
Rys. 5. Przebieg dobowy parowania terenowego (E) w okresie od 01.07.2014 do 07.07.2014 roku na tle wybranych parametrów meteorologicznych

$Q^*$  – bilans radiacyjny, T – temperatura powietrza,  $\beta$  – stosunek Bowena

The course of evapotranspiration (E) during the period from 01.07.2014 to 07.07.2014 with the selected meteorological characteristics

$Q^*$  – net radiation, T – air temperature,  $\beta$  –Bowen ratio

Ostatni wybrany okres reprezentuje zmienność dobową parowania terenowego w okresie jesiennym, dodatkowo na tle znacznych zmian warunków pogodowych. W ciągu pierwszych dwóch dni analizowanego okresu nad Polską dominował układ niskiego ciśnienia, przynoszący wysokie zachmurzenie i opady atmosferyczne. Bezpośrednio po opadach atmosferycznych (12 września) wystąpiło wysokie parowanie terenowe (powyżej 0,4 mm/h) i nawet w warunkach miejskich bezpośrednio po opadach wartości stosunku Bowena zawierały się w przedziale 0–1. W kolejnych dniach nastąpiła adwekcja chłodniejszych mas powietrza i, pomimo stosunkowo słonecznej pogody, temperatura powietrza systematycznie spadała, a na stacji w BPN pojawiły się pierwsze przymrozki. Na wszystkich analizowanych stacjach stopniowo notowano spadek parowania, a także wzrost wartości stosunku Bowena. Szczególnie w warunkach miejskich i nad polem uprawnym strumień ciepła utajonego dość gwałtownie malał i w godzinach południowych



Rys. 6. Przebieg dobowy parowania terenowego (E) w okresie od 26.07.2014 do 30.07.2014 roku na tle wybranych parametrów meteorologicznych

Q\* – bilans radiacyjny, T – temperatura powietrza, β – stosunek Bowena

The course of evapotranspiration (E) during the period from 26.07.2014 to 30.07.2014 with the selected meteorological characteristics

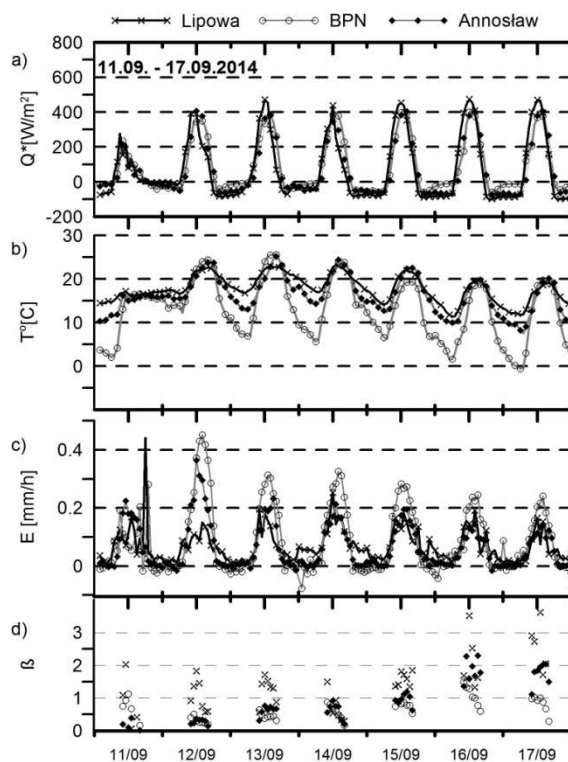
Q\* – net radiation, T – air temperature, β – Bowen ratio

rejestrowane wartości nie przekraczały 0,2 mm/h (rys. 7c). W kolejnych dniach analizowanego okresu wartości stosunku Bowena przekraczają wartość 1 (rys. 7d). W takich warunkach pogodowych największym parowaniem terenowym charakteryzował się obszar bagienny. Notowane sumy godzinne w ciągu dnia wyniosły ponad 0,2 mm/h.

## Wnioski

Charakterystyka porównawcza parowania terenowego na podstawie pomiarów w obszarze zurbanizowanym, nad polem uprawnym i na terenie bagiennym pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. W cieplej porze roku średni przebieg dobowy parowania na terenach zurbanizowanych jest niższy od wartości notowanych na stacjach zamiejskich.



Rys. 7. Przebieg dobowy parowania terenowego (E) w okresie od 11.09.2014 do 17.09.2014 roku na tle wybranych parametrów meteorologicznych

Q\* – bilans radiacyjny, T – temperatura powietrza, β – stosunek Bowena

The course of evapotranspiration (E) during the period from 11.09.2014 to 17.09.2014 with the selected meteorological characteristics

Q\* – net radiation, T – air temperature, β – Bowen ratio

2. Mediana sum dobowych parowania terenowego w Łodzi dla miesięcy od maja do sierpnia zawiera się w przedziale 1,8–2,2 mm/d, podczas gdy w obszarach rolniczych zawiera się ona w przedziale 2,5–3,0 mm/d, a na terenie bagiennym: 2,2–2,8 mm/d. Wartości dobowe uzyskane w terenach zamiejskich cechują się większą zmiennością. Zarówno wyznaczony obszar zmienności sum dobowych parowania, jak i różnica pomiędzy pierwszym a trzecim kwartylem była wyższa od wartości wyznaczonych dla pomiarów miejskich.

3. W okresie wiosennym i w pierwszej połowie lata sumy godzinne parowania terenowego (w godzinach południowych) na terenach rolniczych mogą być nawet dwukrotnie wyższe od tych rejestrowanych w mieście. Jednakże w drugiej połowie lata (po żniwach) wartości uzyskiwane w mieście i nad polem uprawnym są dość zbliżone. Natomiast najwyższym parowaniem w tym okresie, jak i jesienią, cechuje się obszar bagienny.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2011–2014 jako projekt badawczy nr N N306 717740 oraz 2011/01/B/ST10/07550.

## Literatura

- Affre Christine, Alain Lopez, Arnaud Carrara, Aimé Druilhet, Jacques Fontan. 2000. „The analysis of energy and ozone flux data from the LANDES experiment”. *Atmospheric Environment* 34 (5): 803-821.
- Andersen Carmel T., Ian D. L. Foster, Chris J. Pratt. 1999. „The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment”. *Hydrological Processes* 13: 597-609.
- Brown Robert A., Michael Borst. 2015. „Quantifying evaporation in a permeable pavement system”. *Hydrological Processes* 29 (9): 2100-2111.
- Dutaur Laure, Stanislaw Cieslik, Arnaud Carrara, Alain Lopez. 1999. „The detection of nonstationarity in the determination of deposition fluxes”. *Transactions on Ecology and the Environment* 28: 171-176.
- Foken Thomas. 2008. *Micrometeorology*. Berlin: Springer.
- Fortuniak Krzysztof. 2010. *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Fortuniak Krzysztof, Kazimierz Kłysik, Joanna Wibig. 2006. „Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź”. *Theoretical and Applied Climatology* 84 (1): 91-101.
- Fortuniak Krzysztof, Christine Susan B. Grimmond, Brian Offerle, Włodzimierz Pawlak, Mariusz Siedlecki. 2008. Singularities of turbulent urban heat fluxes in Łódź. W: Kazimierz Kłysik, Joanna Wibig, Krzysztof Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*, 233-242. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Fortuniak Krzysztof, Włodzimierz Pawlak, Mariusz Siedlecki, Mariusz Zieliński. 2012. „Urban flux measurement in Łódź, central Poland”. *FluxLetter* 5 (1): 14-20.
- Göbel Patricia, Philippe Starke, Wilhelm G. Coldewey. 2008. Evaporation measurement on enhanced water-permeable paving in urban areas. W: *11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK*, 1-8.
- Grimmond Christine Susan B., Timothy R. Oke. 1991. „An evapotranspiration-interception model for urban areas”. *Water Resources Research* 27 (7): 1739-1755.
- Grimmond Christine Susan B., Timothy R. Oke. 1998. „Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model”. *Journal of Applied Meteorology* 38: 922-940.
- Grimmond Christine Susan B., Matthias Roth, Timothy R. Oke, Yong C. Au, Martin Best, Richard Betts, Gregory Carmichael, Hellen Cleugh, Walter Dabberdt, Rohinton Emmanuel, Edmilson Freitas, Krzysztof Fortuniak, Steven Hanna, Petra Klein, Laurence S. Kalkstein, Chunho H. Liu, Alex Nickson, David Perlmutter, David Sailor, James Voogt. 2010. „Climate and more sustainable cities: climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective)”. *Procedia Environmental Sciences* 1: 247-274.
- Järvi Leena, Christine Susan B. Grimmond, Maija Taka, Annika Nordbo, Heikki Setälä, Ian B. Strachan. 2014. „Development of the surface urban energy and water balance scheme (SUEWS) for cold climate cities”. *Geoscientific Model Development* 7: 1691-1711.
- Kotthaus Simone, Christine Susan B. Grimmond. 2014a. „Energy exchange in a dense urban environment – Part I: Temporal variability of long-term observations in central London”. *Urban Climate* 10 (2): 261-280.
- Kotthaus Simone, Christine Susan B. Grimmond. 2014b. „Energy exchange in a dense urban environment – Part II: Impact of spatial heterogeneity of the surface”. *Urban Climate* 10 (2): 281-307.
- Loridan Thomas, Christine Susan B. Grimmond. 2012. „Characterization of energy flux partitioning in urban environments: links with surface seasonal properties”. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51: 219-241.
- Mahrt Larry. 1998. „Flux sampling errors for aircraft and towers”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15 (2): 416-429.
- Marasco Daniel E., Patricia J. Culligan, Wade R. McGillis. 2015. „Evaluation of common evapotranspiration model based on measurements from two extensive green roofs in New York City”. *Ecological Engineering* 84: 451-462.
- Marasco Daniel E., Betsy N. Hunter, Patricia J. Culligan, Stuart R. Gaffin, Wade R. McGillis. 2014. „Quantifying evapotranspiration from urban green roofs: a comparison of chamber measurements with commonly used predictive methods”. *Environmental Science and Technology* 48 (17): 10273-10281.
- Matuszkiewicz Aniela J. 2004. *Roślinność nieleśna*. W: Henryk Banaszuk (red.) *Kotlina Biebrzańska i Biebrzański Park Narodowy. Aktualny stan, walory, zagrożenia i potrzeby czynnej ochrony środowiska. Monografia przyrodnicza*, 423-437. Białystok: Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko.
- Taha Haider. 1997. „Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and antropogenic heat”. *Energy and Buildings* 25 (2): 99-103.



- Ward Helen C., Jonathan G. Evans, Christine Susan B. Grimmond. 2013. „Multi-season eddy covariance observation of energy, water and carbon fluxes over a suburban area in Swindon, UK”. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (9): 4645-4666.
- Webb Eric K., Graeme I. Pearman, Ray Leuning. 1980. „Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer”. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society* 106 (447): 85-100.
- Weber Stephan, Wilhelm Kuttler. 2005. „Surface energy balance characteristics of a heterogeneous urban ballast facet”. *Climate Research* 28: 257-266.

## Summary

Evapotranspiration from urbanized areas has been assumed to be lower than the one from natural and agricultural areas. The main reason of this phenomenon is connected with the supposed contrast between the hydrologic properties of building materials and vegetation-covered surfaces. Lastly, the urban evapotranspiration has received increasing attention in the fields of urban climatology, urban hydrology and management of green urban areas (e.g. parks and green roofs). In this paper, we compare measurements of evapotranspiration in urban area with results from agricultural and wetlands areas.

Several methods have been developed to measure or estimate evapotranspiration. However, due to very varied land use of urban areas and very complicated vertical structure of buildings, the best way to assess the turbulent latent heat fluxes is the eddy covariance method. In this technique, the exchange of water fluxes between surface and the atmosphere is established from a fixed in situ measurement point like a tower.

The investigation is based on three eddy covariance stations representing different environment conditions (Fig. 1). Urban measurements were made on a mast at 37 m above ground level (the tower is 20 m tall and mounted on the roof of a 17 m building). The station is located in the western part of central district of Łódź (Lipowa street) in dense development, where buildings are 7–13 m high and cover 15–40% of the surrounding area. The wetland measurement station is located in the Biebrza National Park in the neighbourhood of the village Kopytkowo (53°35'20"N; 22°53'31"E), within the so-called Central Basin covering the area of the largest marshlands and peatlands which are named the

Red Marsh. In the immediate vicinity of the measurement site (~ 500 m), there occur rush communities with the dominating reed sweetgrass (*Glycerietum maximae*) and the common reed (*Phragmitetum communis*), as well as moss and sedge communities represented by the *Carici canescentis-Agrostietum caninae*. The agriculture measurement point is located in the village Annosław, 80 km to the south of Warsaw (51°45'1.04"N; 20°25'3.22"E; 165 m a.s.l.). This study was made at a typical Polish farmland characteristic of Central and Southern Poland. The typical Polish farmland is characterized by very narrow (10–20 m) and long (100–200 m) parcels. In this case, different plants like potato, raspberries, strawberries, mixture of grains, broad bean and fruit trees are cultivated in the surrounding fields.

All eddy covariance measurement systems were prepared with a 3D sonic anemometer (RMYoung 81000) and Li7500 infrared CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O gas analyzer. The fast-response data output was set to 10 Hz and next subsequently water vapor fluxes were calculated for 1-hour periods by simple block averaging. Moreover, the final fluxes are corrected to account for the influence of humidity on sonic temperature, and in the post-processing data quality assessment, three stationarity tests are used to check the stationarity postulate.

The comparison of the evapotranspiration from those three analyzed stations confirmed that the urban areas are characterized by the lowest values of water vapor fluxes, especially during the spring and early summer. Contrarily, in the urban areas, from March to July, the mean hourly totals of evapotranspiration at noon change from 0.15 mm/h to 0.20 mm/h, while these values obtained from wetland and agricultural measurement exceed 0.25 mm·h<sup>-1</sup> (Fig. 2). A similar tendency is observed in daily totals of evapotranspiration. For example, the median of daily totals observed from urban measurement varied from 1.8 mm/d in May to 2.2 mm/d in June and July. However, in agricultural area during these months, the median of daily totals ranged from 2.8 to 3.0 mm/d. The highest evapotranspiration from wetland environment is reached in July when the median of daily totals is 3.4 mm/h (Fig. 3).

The next part of this work presents the changes of the daily course of evapotranspiration during different weather conditions and vegetation development. The first period (04–12.05.2014) presents the changes of evapotran-

spiration during the spring season with steeply increasing temperature and short precipitation events. During this period, the highest values of the water vapour fluxes were observed in the agricultural area (compared to the other two analysed stations). Moreover the agricultural evapotranspiration does not increase after the appearance of precipitation, whereas such a change in weather conditions in an urban area caused a significant increase of urban evapotranspiration (Fig. 4).

Next, the second selected period represents a change in the rate of evapotranspiration during

the hot, sunny weather with the highest development of vegetation and after harvest. In the first part of July, the hourly totals of evapotranspiration at noon cross 0.4 mm/h in the agricultural area, whereas these values observed over the urban surface vary from 0.2 to 0.3 mm/h (Fig. 5). On the other hand, during the last part of July after harvest the evapotranspiration from agricultural fields decreases significantly and the hourly totals of evapotranspiration at noon are close to the ones from the urban surface.