

Mariusz SIEDLECKI, Włodzimierz PAWLAK, Krzysztof FORTUNIAK

Katedra Meteorologii i Klimatologii UŁ

Mariusz ZIELIŃSKI

Zakład Ekorozwoju i Kształtowania Środowiska Geograficznego,

Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie

PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD UZUPEŁNIANIA LUK W POMIARACH KOWARIANCYJNYCH STRUMINIA CIEPŁA UTAJONEGO W RÓŻNYCH TYPAH ŚRODOWISKA

COMPARISON OF SELECTED OF GAP-FILLING TECHNIQUES FOR EDDY COVARIANCE LATENT HEAT FLUXES FOR DIFFERENT LAND COVER TYPES

Metoda kowariancji wirów znajduje coraz szersze zastosowanie w monitorowaniu wymiany masy (H_2O , CO_2 , CH_4) i energii (strumień ciepła jawnego i utajonego) w warstwie granicznej atmosfery. Dzięki jednoczesnym bezpośrednim pomiarom fluktuacji pionowej składowej prędkości wiatru i wilgotności właściwej metoda ta pozwala w sposób bezpośredni na wyznaczenie pionowego strumienia pary wodnej czy też strumienia ciepła utajonego (energetyczny równoważnik ewapotranspiracji). Do zalet należy zaliczyć również to, że zastosowany zestaw przyrządów pozwala na ciągłe automatyczne pomiary, umożliwiając w ten sposób charakterystykę parowania terenowego w różnych warunkach pogodowych i uwilgotnienia podłoża, a także przy odmiennych fazach wegetacji roślin. Jednak w praktyce przy stosowaniu tej metody odsetek uzyskanych poprawnych danych dotyczy ok. 60-70% okresu pomiarowego (Alavi i in., 2006; Chen i in., 2012; Falge i in., 2001a i b; Moffat i in., 2007). Jest to powodowane przez wiele przyczyn, związanych np. z brakiem zasilania elektrycznego, uszkodzeniem przyrządów

pomiarowych czy też z uwagi na pomiary w trudnych warunkach pogodowych (opady atmosferyczne, warunki oszronienia) i słabo rozwiniętej turbulencji. Braki danych to również efekt zastosowania szeregu procedur mających na celu usunięcie błędnych danych, niespełniających kryterium stacjonarności szeregu pomiarowego. Jak wspomniano, wymienione przyczyny powodują, że pomiary kowariancyjne cechują się dość znacznym odsetkiem brakujących danych, utrudniającym właściwe wyznaczenie wartości dobowych, dekadowych lub miesięcznych ewapotranspiracji. Dlatego też istnieje potrzeba uzupełnienia brakujących danych, przy czym z uwagi na specyfikę pomiarów kowariancyjnych rozwiązanie tego problemu doczekało się wypracowania różnych metod ich uzupełniania.

Wśród stosowanych metod można wydzielić następujące grupy: filtry statystyczne (np. *mean diurnal variation* MDV, filtr Kalmana), metody regresji liniowej lub regresji wielokrotnej, modele fizyczne (np. formuła Penmana-Monteitha) lub też tzw. metody *look-up table*, w których uzupełnienie brakujących danych polega na zastosowaniu wielowymiarowych macierzy ze średnimi wartościami poszukiwanej wartości w określonych warunkach pogodowych (Papale, 2012). Wybór zastosowanej metody zależy w głównej mierze od celu badania i dostępności dodatkowych danych meteorologicznych, na podstawie których wyznacza się brakujące dane strumienia pary wodnej. Ocenę zastosowanej procedury dokonuje się zwykle poprzez porównanie uzyskanych wartości z wynikami z pomiarów kowariancyjnych w wybranych okresach lub określonych warunkach pogodowych i wyznaczeniu średniej różnicy, średniego błędu kwadratowego lub analizę korelacji uzyskanych wartości. Dość znaczny odsetek prac poświęconych jest uzupełnianiu brakujących danych w pomiarach turbulencyjnego strumienia dwutlenku węgla (np. Falge i in., 2001a; Moffat i in., 2007; Hui i in., 2004; Richardson, Holinger, 2007), a w ostatnich latach strumienia metanu (np. Dengel i in., 2013; Fortuniak i in., 2017). W mniejszym zakresie zagadnienie to jest podejmowane w pracach dotyczących uzupełniania danych strumienia pary wodnej (np. Alavi i in., 2006; Chen i in., 2012; Park i in., 2015). Na przykład, w opracowaniu porównawczym wybranych metod uzupełniania danych strumienia ciepła utajonego nad polem uprawnym i lasami Park i in. (2015) wskazują najlepsze wyniki w przypadku metody MDV i filtra Kalmana, natomiast największy średni błąd jest uzyskiwany w przypadku metody Penmana-Monteitha. Z kolei Alavi i in. (2006) najlepszą zgodność uzyskują w przypadku metody DLR (*dynamical linear regresion*), przy czym na otrzymane wyniki ma wpływ pora roku i osiągnięte wartości strumienia ciepła utajonego.

Podstawowym celem niniejszego opracowania jest ocena zastosowania wybranych metod uzupełniania brakujących danych w strumieniu turbulencyjnym ciepła utajonego Q_e w przypadku pomiarów w terenach zurbanizowanych, a także w warunkach pola uprawnego i na obszarach bagiennych. Zagadnienie to jest dość rzadko poruszane w polskiej literaturze, a przedstawione wyniki mogą być istotne w ocenie uzyskiwanych wartości w przypadku podobnych pomiarów.

Material i metody

W opracowaniu wykorzystano wyniki pomiarów turbulencyjnego strumienia pary wodnej przeprowadzonych na trzech stanowiskach pomiarowych (rys. 1). Warunki miejskie reprezentuje pierwsza stacja, zlokalizowana w zachodniej części ścisłego centrum Łodzi przy ulicy Lipowej (51°45'45"N; 19°26'43"E). Przyrządy pomiarowe zamontowano na maszcie na wysokości ok. 37 m nad gruntem, tj. ok. 25 m nad średnią wysokością budynków. Umieszczenie przyrządów na takiej wysokości pozwala mieć nadzieję, że znajdują się one w warstwie powierzchniowej ponad górną granicą warstwy tarcia. W najbliższym otoczeniu dominuje zwarta zabudowa miejska z przewagą 3-4 kondygnacyjnych budynków, a odsetek powierzchni zielonych nie przekracza 40%.

Druga stacja pomiarowa reprezentuje warunki obszarów rolniczych charakterystyczne dla środkowej Polski. Stanowisko znajduje się w miejscowości Annośław (woj. łódzkie), położonej ok. 65 km na wschód od Łodzi (51°45'1,04"N; 20°25'3,22"E; 165 m n.p.m.). Przyrządy pomiarowe są zamontowane na maszcie na wysokości 3,1 m nad gruntem, a w najbliższym otoczeniu stacji pomiarowej dominują uprawy pszenicy, mieszanki zbożowej, ziemniaków, truskawek i malin.

Trzecia stacja pomiarowa jest zlokalizowana w środowisku bagiennym, na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego, w sąsiedztwie miejscowości Kopytkowo (53°35'20"N, 22°53'31"E). Tereny te to największy kompleks bagien i torfowisk, zwanych „Czerwonym Bagnem”. W bezpośrednim otoczeniu punktu pomiarowego (~ 500 m) występują formacje szuwarowe i mszysto-turzycowe, które szeroko występują 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 były rejestrowane z częstotliwością 10Hz. Składniki bilansu radiacyjnego zmierzono z wykorzystaniem bilansomierza CNR1 (Kipp&Zonen, Holandia).

Wyniki pomiarów z zastosowaniem wymienionych przyrządów posłużyły do wyznaczenia pionowego strumienia ciepłą utajonego Q_e z zastosowaniem metody kowariancyjnej. W obliczeniach przyjęto tradycyjne uśrednianie Reynoldsa w przedziałach godzinnych. Zastosowano również standardowe kroki weryfikacji danych, takie jak: eliminacja sztucznych impulsów elektrycznych, obroty układów współrzędnych, korekcie 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. Pomiaru wykonane w takich warunkach również pominięto w dalszej analizie.

W opracowaniu zastosowano trzy wybrane metody uzupełniania luk pomiarowych należące do różnych grup. Pierwszą jest metoda średniego dobowego przebiegu (MDV – *mean diurnal variation*), w której uzupełnianie danych polega na wyznaczeniu średniego dobowego przebiegu ciepła utajonego na podstawie pomiarów poprzedzających i następujących po okresie, w którym pojawiła się luka pomiarowa. Jest to metoda dość powszechnie stosowana z uwagi na łatwość jej wdrożenia; np. jeżeli nie dysponujemy równoległymi pomiarami dodatkowych parametrów meteorologicznych skorelowanych ze strumieniem Q_e wymaganymi przy innych metodach. Odrębnym zagadnieniem jest dobór wielkości tzw. okna – liczby dni, na podstawie których wyznaczany jest średni przebieg dobowy. W przypadku strumienia ciepła utajonego lub ciepła jawnego zalecany (i zastosowany w tym opracowaniu) jest przedział długości 14 dni (Falge i in., 2001a i b).

Drugą metodą zastosowaną w opracowaniu jest metoda regresji wielokrotnej, polegająca na wyznaczeniu parametrów równania regresji wielokrotnej wskazujących związek strumienia Q_e z wybranymi parametrami meteorologicznymi mającymi bezpośredni wpływ na ewapotranspirację. W przypadku terenów rolniczych i obszarów bagiennych zmiennymi objaśniającymi są bilans radiacyjny Q^* , strumień ciepła w gruncie Q_g , a także niedosyt wilgotności powietrza D . Natomiast do pomiarów miejskich wykorzystano wartości Q^* , wartości strumienia ciepła antropogenicznego (Q_f) i ciepła nagromadzonego w powierzchni miejskiej (Q_s), a także niedosytu wilgotności powietrza. Parametry funkcji regresji wyznaczono z zastosowaniem tzw. wzorów Ezekeiela (Sobczyk, 1997). Parametry funkcji regresji zostały wyznaczone oddzielnie do kolejnych okresów pomiarowych.

W trzecim podejściu do uzupełniania luk pomiarowych wykorzystano metodę Penmana-Monteitha (zwykle stosowaną w tzw. grupie *proces-based methods*). Do pomiarów na stacji w BPN i Annosławiu zastosowano formułę Penmana-Monteitha w modyfikacji FAO 56 (Allen i in., 1998, Allen i in., 2006);

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Q^* - Q_g) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad 1$$

gdzie: ET_0 – ewapotranspiracja referencyjna, Q^* – bilans radiacyjny, Q_g – strumień ciepła w gruncie, T – temperatura powietrza, e_s – ciśnienie pary wodnej nasyconej, e_a – aktualne ciśnienie pary wodnej, Δ – nachylenie krzywej saturacji, γ – stała psychrometryczna, u_2 – prędkość wiatru

C_n i C_d to współczynniki zależne od wielkości przedziału, dla którego prowadzone są obliczenia. W niniejszym opracowaniu przyjęto: C_n równe 37, C_d równe 0,24 i 0,96 – odpowiednio dla godzin dziennych i godzin nocnych (Allen i in., 1998; Allen i in., 2006).

W przypadku terenów zurbanizowanych zastosowano zmodyfikowaną formułę Penmana-Monteitha uwzględniającą wartości strumienia ciepła antropogenicznego i ciepła nagromadzonego w powierzchni miejskiej (Grimmond, Oke, 1991; Ward i in. 2013):

$$Q_{e_{PM}} = \frac{\Delta(Q^* + Q_f - Q_s) + \rho C_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad 2$$

gdzie: Q_f – strumienia ciepła antropogenicznego, Q_s – ciepło nagromadzone w powierzchni miejskiej, ρ – gęstość powietrza, C_p – pojemność cieplna powietrza, r_a – opór aerodynamiczny, r_s – opór powierzchniowy.

Wartości oporu aerodynamicznego r_a wyznaczono na podstawie pionowego profilu wiatru, z uwzględnieniem warunków stratyfikacji stałej i obojętnej (Fortuniak, 2010; Ward i in., 2013), natomiast wartości oporu powierzchniowego wyznaczono na podstawie procedury zaproponowanej przez Besta (1998), uwzględniającej takie elementy, jak wpływ promieniowania słonecznego, niedosyt wilgotności i temperatura powietrza (Fortuniak, 2003).

Ocenę zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych przeprowadzono przez porównanie przebiegów dobowych, a także przez analizę wykresów korelacyjnych z dopasowaną liniową funkcją regresji zmiennych. Dodatkowo wyznaczono współczynnik korelacji liniowej (R) i średni pierwiastek błędu ($RMSE$):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad 3$$

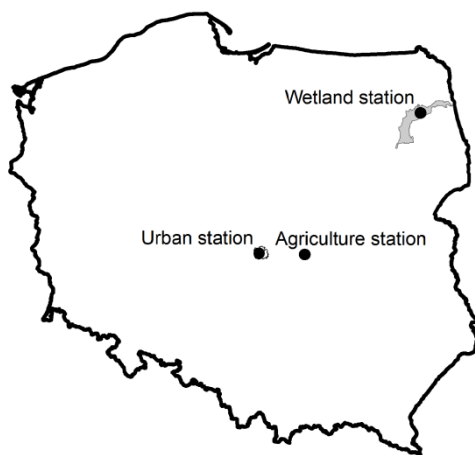
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad 44$$

gdzie x_i i $\bar{x}$ to wyniki obserwacji wraz z wartością średnią, a y_i i $\bar{y}$ to wyniki estymowane z wykorzystaniem wybranych metod wraz z wartością średnią.

Ewaluację wybranych metod przeprowadzono w odniesieniu do czterech miesięcznych okresów: luty 2014, czerwiec 2014, sierpień 2013 i wrzesień 2013, co pozwala na ukazanie wyników dotyczących odmiennych warunków pogodowych oraz przy różnych fazach rozwoju roślinności (na stacjach zamiejskich).

Wyniki i dyskusja

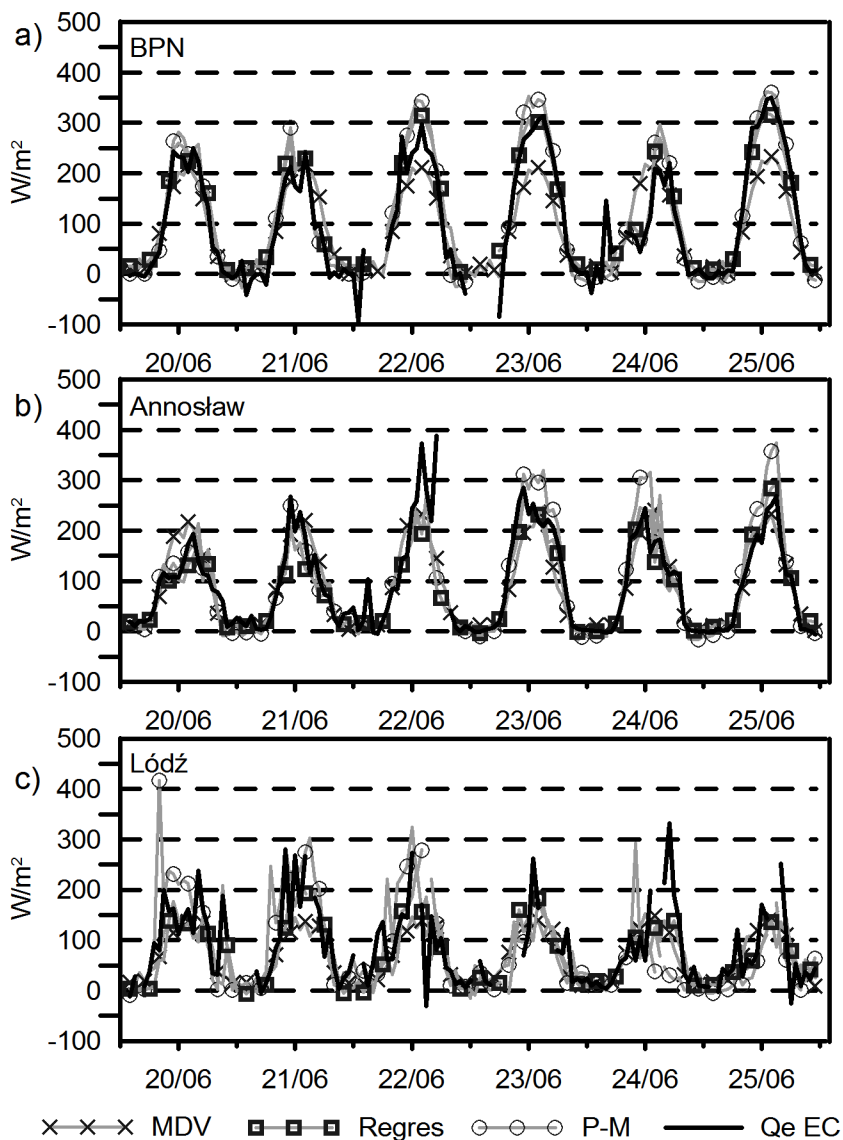
W pierwszym etapie oceny zastosowanych metod uzupełniania luk w pomiarach strumienia pary wodnej (Q_e) porównano przebiegi dobowe uzyskanych wartości. Pozwala to na wstępną ocenę zgodności zastosowanych metod, a przede wszystkim na wskazanie pory doby lub warunków pogodowych, w których zaznaczają się największych rozbieżności. Na przykład, w okresie słonecznej, ciepłej pogody w drugiej połowie czerwca, w godzinach południowych na obszarach bagiennych (rys. 1a), jak i obszarach rolniczych (rys. 1b) można stwierdzić ten-



Rys. 1. Lokalizacja stacji pomiarowych
Fig. 1. The location of measurement stations

dencję do uzyskiwania wyższych wartości Q_e przy zastosowaniu metody Penmana-Monteitha. Podobną tendencję zauważa się podczas analizy przebiegów dobowych w sierpniu i wrześniu (nieprezentowane w pracy). Jednak największe rozbieżności analizowanych wartości są charakterystyczne dla okresu zimowego. Na wszystkich trzech punktach pomiarowych na wykresach korelacyjnych wartości z pomiarów są wyższe od tych ze stosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych (rys. 3a, 4a, 5a). Współczynniki nachylenia krzywej regresji nie przekraczają 0,5, a wartość współczynnika korelacji liniowej zmienia się od 0,34 w przypadku metody MDV w obszarze zurbanizowanym do 0,6-0,65 w przypadku metody regresji wielokrotnej i metody Penmana-Monteitha zastosowanych do pomiarów w terenie rolniczym i bagiennym (tab. 1-3).

W przypadku sezonu letniego (czerwiec i sierpień) zastosowane metody uzupełniania danych pomiarowych osiągają wartości najbardziej zbliżone do tych z pomiarów. Wartości współczynnika nachylenia krzywej regresji w przypadku stacji zamiejskich osiągają wartości 0,7 – 0,9 (rys. 3b i c, 4b i c, 5b i c),



Rys. 2. Porównanie przebiegu dobowego strumienia ciepła utajonego (Q_e EC) z wynikami uzyskanymi z zastosowania wybranych metod uzupełniania luk pomiarowych (MDV – metoda średniego dobowego przebiegu, Regres – metoda regresji wielokrotnej, P-M – metoda Penmana-Monteitha)

Fig. 2. The comparison of daily course of latent heat fluxes (Q_e EC) with the results obtain from selected gap filling methods (MDV – mean diurnal variation method, Regres – multi regression method, P-M – Penman-Monteith method)

Tabela 1. Współczynnik korelacji liniowej (R) i średni błąd kwadratowy (RMSE) między pomierzonymi wartościami Q_e i wynikami zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych w przypadku obszarów rolniczych

Table 1. The statistics (correlation coefficient – R and root mean square – RMSE) of estimated and observed values of Q_e for chosen periods at agricultural area

Miesiąc / Month	Statystyka / Statistics	Metoda uzupełniania danych / Gap filling method		
		MDV	Regres	P-M
Luty / February	R	0,59	0,6	0,65
	RMSE	15,48	14,8	13,62
Czerwiec / June	R	0,86	0,92	0,94
	RMSE	52,32	43,21	33,45
Sierpień / August	R	0,84	0,88	0,82
	RMSE	30,62	26,77	34,68
Wrzesień / September	R	0,69	0,76	0,71
	RMSE	38,92	29,00	38,29

Tabela 2. Współczynnik korelacji liniowej (R) i średni błąd kwadratowy (RMSE) między pomierzonymi wartościami Q_e i wynikami zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych w przypadku obszarów bagiennych

Table 2. The statistics (correlation coefficient – R and root mean square – RMSE) of estimated and observed values of Q_e for chosen periods at wetland area

Miesiąc / Month	Statystyka / Statistics	Metoda uzupełniania danych / Gap filling method		
		MDV	Regres	P-M
Luty / February	R	0,48	0,61	0,62
	RMSE	16,40	13,61	13,61
Czerwiec / June	R	0,83	0,92	0,92
	RMSE	53,72	38,14	39,60
Sierpień / August	R	0,85	0,91	0,91
	RMSE	55,44	41,44	42,40
Wrzesień / September	R	0,72	0,83	0,85
	RMSE	45,89	38,04	35,67

a współczynnik korelacji liniowej w przypadku metody regresji wielokrotnej i metody Penmana-Monteitha zawiera się w zakresie 0,82-0,94. Nieco gorsze wyniki wskazywane są w przypadku metody MDV, gdzie współczynnik korelacji liniowej przyjmuje wartości na poziomie 0,84 – 0,88, a średni pierwiastek kwadratowy z różnic analizowanych wartości sięga ponad 50 W m⁻², podczas

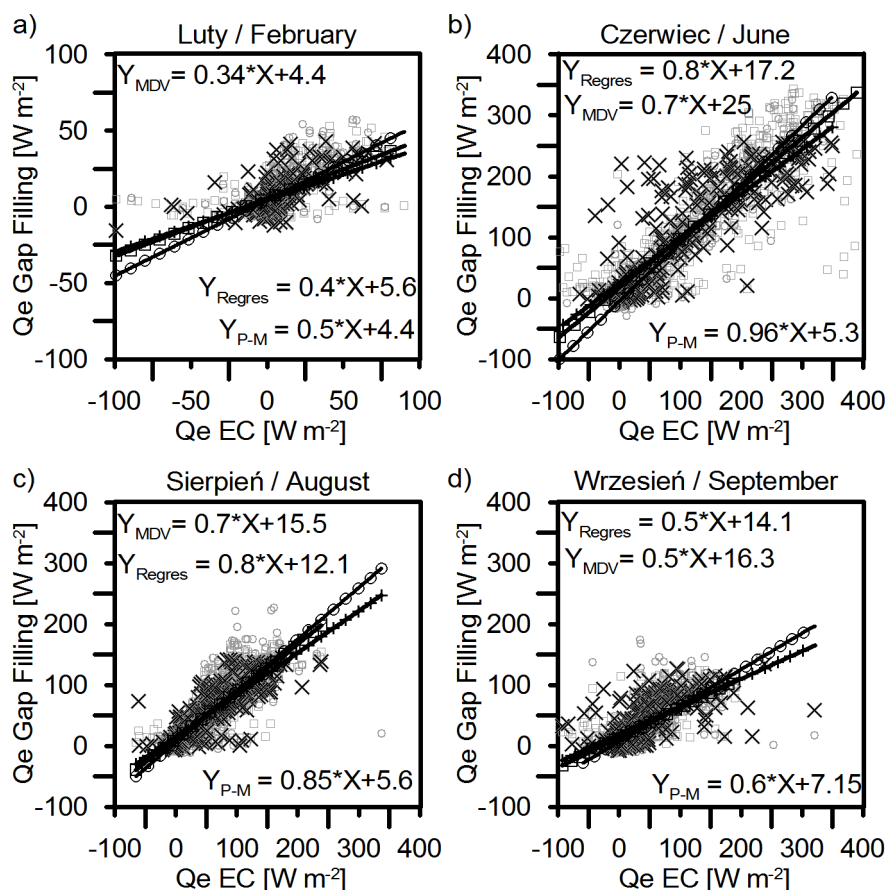
Tabela 3. Współczynnik korelacji liniowej (R) i średni błąd kwadratowy (RMSE) między pomierzonymi wartościami Q_e i wynikami zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych w przypadku obszarów zurbanizowanych

Table 3. The statistics (correlation coefficient – R and root mean square – RMSE) of estimated and observed values of Q_e for chosen periods at urban area

Miesiąc / Month	Statystyka / Statistics	Metoda uzupełniania danych / Gap filling method		
		MDV	Regres	P-M
Luty / February	R	0,37	0,62	0,34
	RMSE	19,13	16,4	21,20
Czerwiec / June	R	0,66	0,82	0,64
	RMSE	47,67	36,51	58,25
Sierpień / August	R	0,68	0,85	0,67
	RMSE	41,33	29,68	50,57
Wrzesień / September	R	0,55	0,83	0,53
	RMSE	50,12	31,18	51,38

gdy w przypadku pozostałych metod wartości RMSE były niższe 26 – 43 $W m^{-2}$. Podobne wyniki wskazywane są przez Alavi i in. (2006) dotyczące pomiarów nad polem pszenicy ozimej, jak przez Park i in. 2015 dla podobnych badań nad lasem uprawnym i obszarami rolniczymi w Korei. Wyniki te pokazują tendencję do nieco niższych wartości MDV, szczególnie w godzinach południowych, kiedy to notuje się najwyższe wartości Q_e w warunkach naturalnej roślinności bagiennej i roślinności uprawnej.

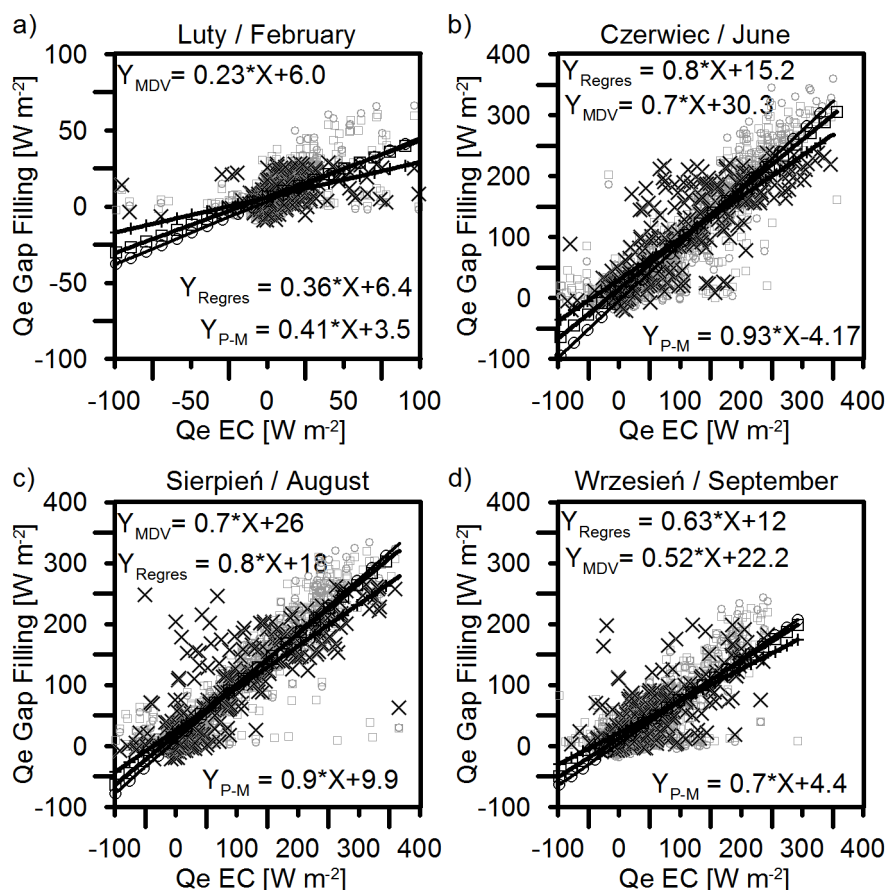
W przypadku warunków miejskich najlepsze wyniki są uzyskiwane z metody regresji wielokrotnej. Współczynnik korelacji liniowej w rozpatrywanych miesiącach przekracza 0,8, a wartości RMSE zmieniają się od 29 do 36 $W m^{-2}$. Natomiast wyniki z metody MDV i P-M charakteryzują się większymi różnicami w stosunku do pomiarów. W tym przypadku współczynnik korelacji liniowej zawiera się w zakresie 0,64-0,68, a uzyskiwane wartości średnio różnią się od tych z pomiarów o 40-60 $W m^{-2}$. Większe różnice w przypadku metody MDV (również w przypadku pomiarów zamiejskich) pokazują, że zastosowana procedura ma tendencję do wygładzania uzyskiwanych wartości, szczególnie w godzinach południowych. Natomiast gorsze dopasowanie wartości uzyskiwanych z metody Penmana-Monteitha w warunkach miejskich w znacznej mierze jest powodowane przez zastosowaną procedurę wyznaczania takich elementów, jak ciepła antropogenicznego (Q_f) czy też ciepła nagromadzonego w powierzchni miejskiej. Również zastosowana procedura wyznaczenia oporu powierzchniowego może przyczyniać się do gorszych wyników w charakterystyce wartości Q_e w warunkach miejskich.



Rys. 3. Porównanie wartości strumienia ciepła utajonego uzyskanych z pomiarów kowariancyjnych ($Q_e EC$) na obszarze rolniczym (Annosław) z wynikami uzyskanymi z zastosowania wybranych metod uzupełniania luk pomiarowych w poszczególnych miesiącach (MDV – metoda średniego dobowego przebiegu, Regres – metoda regresji wielokrotnej, P-M – metoda Penmana-Monteitha)

Fig. 3. The comparison of measurement ($Q_e EC$) and estimated values ($Q_e Gap Filling$) of latent heat fluxes for chosen period at agricultural area (MDV – mean diurnal variation method, Regres – Multi-regression method, P-M – Penman-Monteith method)

W okresie jesiennym na stacjach zamiejskich na skutek zmian w szacie roślinnej zachodzi znacznie mniejsza ewapotranspiracja. Stwierdzono wzrost różnic między pomiarami a wynikami stosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych. Współczynniki korelacji liniowej w przypadku pomiarów we wrześniu zawierają się w zakresie 0,7-0,8, a wartości RMSE rosną od $30 W m^{-2}$ w metodzie regresji wielokrotnej do ponad $40 W m^{-2}$ metodzie MDV w przypadku pomiarów w obszarach bagiennych. Natomiast w przypadku obszarów zurbanizowanych wyniki porównania pomiarów z zastosowanymi metodami są dość zbliżone do tych z uzyskanych



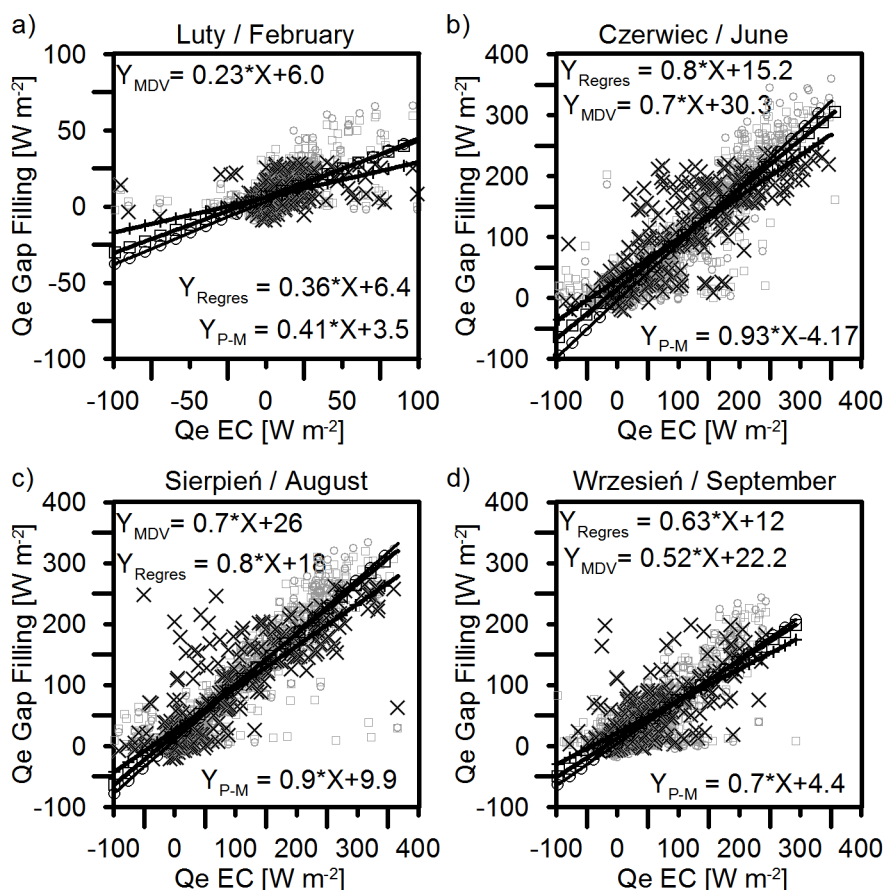
Rys. 4. Jak na rysunku 3 – na obszarze bagiennym

Fig. 4. The same like for fig. 3 but for wetland area

w okresie letnim. Największe różnice charakterystyczne są w przypadku metod MDV i P-M. Najlepszą zgodność natomiast uzyskuje się w wyniku zastosowania metody regresji wielokrotnej.

Uzupełnianie luk w pomiarach strumienia turbulencyjnego pary wodnej w głównej mierze ma na celu umożliwić wyznaczanie wartości dobowych lub miesięcznych ewapotranspiracji rzeczywistej. Zatem ważnym etapem przeprowadzonej analizy jest ocena, jak wskazane wcześniej rozbieżności wartości godzinnych wpływają na wartości strumienia ciepła utajonego w dłuższych okresach. Dlatego też w kolejnym kroku przeprowadzono porównanie sum dobowych ciepła utajonego (w $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) uzyskanych z pomiarów kowariancyjnych i zastosowanych metod.

Opisywane rozbieżności w przypadku wartości godzinnych Q_e w okresie zimowym (luty) powodują, że średnia suma dobowa ciepła utajonego jest wyższa



Rys. 5. Jak na rysunku 3 – obszarze zurbanizowanym

Fig. 5. The same like for fig. 3 but for urban area

(w zakresie $0,1-0,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) od tych z zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych (tab. 4-6). W czerwcu i sierpniu na stanowiskach zamiejskich (tab. 4, 5) wyznaczone sumy dobowe na podstawie metody MDV i regresji wielokrotnej są bardzo zbliżone do tych uzyskanych z pomiarów i średnio różnica ta nie przekracza $0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Wyniki uzyskiwane z zastosowania metody Penmana-Monteitha dają w efekcie niższe sumy dobowe (zwykle o ponad $0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). W okresie jesiennym (wrzesień) dość zgodnymi wartościami, szczególnie w warunkach pola uprawnego, cechują się wyniki uzyskiwane z metody MDV (tab. 4). W przypadku pozostałych metod uzyskiwane sumy dobowe były średnio niższe od tych z pomiarów kowariancyjnych.

W warunkach obszarów zurbanizowanych zarówno w czerwcu, sierpniu, jak i we wrześniu najwyższą zgodnością cechują się sumy dobowe uzyskiwane

Tabela 4. Średnia dobową sumę Q_e ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) z pomiarów kowariancyjnych i zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych w przypadku obszarów rolniczych

Table 4. The mean daily sum of Q_e ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) based on measurement and gap filling estimation at agricultural area

Miesiąc / Month	Statystyka / Statistics	Pomiary/ Measurement	Metoda uzupełniania danych / Gap filling method		
			MDV	Regres	P-M
Luty / February	Średnia/Mean	0,7	0,52	0,60	0,6
Czerwiec / June	Średnia/Mean	7,6	7,8	7,9	6,9
Sierpień / August	Średnia/Mean	4,0	4,15	4,07	4,2
Wrzesień / September	Średnia/Mean	3,1	3,1	2,6	2,4

Tabela 5. Średnia dobową sumę Q_e ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) z pomiarów kowariancyjnych i zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych w przypadku obszarów bagiennych

Table 5. The mean daily sum of Q_e ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) based on measurement and gap filling estimation at wetland area

Miesiąc / Month	Statystyka / Statistics	Pomiary/ Measurement	Metoda uzupełniania danych / Gap filling method		
			MDV	Regres	P-M
Luty / February	Średnia/Mean	0,62	0,66	0,8	0,50
Czerwiec / June	Średnia/Mean	7,55	7,46	7,0	6,0
Sierpień / August	Średnia/Mean	6,8	7,0	6,5	6,1
Wrzesień / September	Średnia/Mean	2,8	3,4	2,5	2,2

Tabela 6. Średnia dobową sumę Q_e ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) z pomiarów kowariancyjnych i zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych w przypadku obszarów zurbanizowanych

Table 6. The mean daily sum of Q_e ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) based on measurement and gap filling estimation at urban area

Miesiąc / Month	Statystyka / Statistics	Pomiary/ Measurement	Metoda uzupełniania danych / Gap filling method		
			MDV	Regres	P-M
Luty / February	Średnia/Mean	0,8	0,7	0,52	0,57
Czerwiec / June	Średnia/Mean	5,06	5,42	4,9	5,5
Sierpień / August	Średnia/Mean	4,07	4,12	4,03	4,56
Wrzesień / September	Średnia/Mean	3,52	3,84	3,51	3,29

z zastosowania metody regresji wielokrotnej (tab. 6). W przypadku pozostałych zastosowanych metod wyznaczone sumy dobowe cechowały się większymi różnicami, przy czym średnio różnice nie przekroczyły $0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (tab.6).

Podsumowując, można stwierdzić, że zastosowane metody uzupełniania luk pomiarowych strumienia ciepła utajonego dostarczają dość dobre wyniki, szczególnie w okresie wiosennym i letnim. Wskazane średnie różnice Q_e , zwykle na poziomie kilkunastu watów na metr kwadratowy, dają w efekcie średnie różnice sum dobowych ewapotranspiracji (po przeliczeniu) na poziomie $0,2 \text{ mm d}^{-1}$. Przy wyborze określonej metody do uzupełnienia luk w serii pomiarowej Q_e większe znaczenie mogą mieć dodatkowe czynniki, takie jak cel przeprowadzanych badań strumienia ciepła utajonego oraz dostępność dodatkowych zmiennych (wyniki pomiarów bilansu radiacyjnego, ciepła w gruncie, temperatury powietrza). Na przykład, wyniki uzyskiwane z zastosowania metody MDV mają tendencję do niższych wartości w godzinach południowych w warunkach cieplej, słonecznej pogody. Jednocześnie zastosowanie tej metody jest stosunkowo proste i nie wymaga dodatkowych zmiennych potrzebnych przy zastosowaniu innych metod. Jest to dość istotny argument w przypadku awarii zasilania, gdy jednocześnie może wystąpić brak pomiarów strumienia ciepła utajonego, jak i pozostałych elementów meteorologicznych. Natomiast w przypadku tylko awarii przyrządów do pomiarów kowariancyjnych lub uzupełniania luk pomiarowych powstałych na skutek zastosowanych procedur weryfikacji danych lepsze rezultaty możemy uzyskać, stosując metodę regresji wielokrotnej lub metodę Penmana-Monteitha (zwłaszcza w przypadku obszarów zamiejskich).

Wnioski

W pracy zaprezentowano wyniki porównania trzech metod uzupełniania luk w pomiarach strumienia ciepła utajonego w trzech rodzajach środowiska: obszary rolnicze, tereny bagienne i obszary zurbanizowane. Porównanie przeprowadzono na podstawie miesięcznych serii pomiarowych, reprezentujących poszczególne pory roku. Uzyskane wyniki pozwalają na wskazanie następujących wniosków:

- dużą zgodność danych pomiarowych i wyników z zastosowania metod regresji wielokrotnej i Penmana-Monetitha w przypadku obszarów zamiejskich w miesiącach wiosennych i letnich; współczynniki korelacji liniowej w tym przypadku zawierały się w zakresie 0,91- 0,94;
- w przypadku obszarów zurbanizowanych najwyższą zgodnością cechują się wyniki uzyskiwane z zastosowania metody regresji wielokrotnej;
- największe różnice charakterystyczne są w przypadku sezonu zimowego; małe wartości strumienia ciepła utajonego oraz relatywnie duża zmienność

pomierzonych wartości może przyczyniać się gorszych rezultatów w procedurze uzupełniania luk w seriach pomiarowych.

Praca finansowana ze środków finansowych Narodowego Centrum Nauki przeznaczonych na realizację projektów badawczych: nr N N306 717740, 2011/01/D/ST10/07419, 2015/17/B/ST10/02187 oraz 2011/01/B/ST10/07550. Autorzy dziękują Dyrekcji Biebrzańskiego Parku Narodowego za umożliwienie prowadzenia badań na terenie Parku

Materiały wpłynęły do redakcji 16 III 2017.

Literatura

- Affre C., Lopez A., Carrara A., Druilhet A., Fontan J., 2000, *The analysis of energy and ozone flux data from the LANDES experiment*. Atmospheric Environment, 34, 803-821.
- Alavi N, Warland J.S., Berg A.A., 2006, *Filling gaps in evapotranspiration measurements for water budget studies: evaluation of a Kalman filtering approach*. Agric For Meteorol., 141, 57-66.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998, *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rome.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Beselga J., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I., Elliott R., 2006, *A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method*. Agric. Water Manage. 81, 1-22.
- Best M.J., 1998, *A model to predict surface temperature*. Boundary-Layer Meteorology 88, 279-306.
- Chen Y.Y., Chu C.R., Li M.H., 2012, *A gap-filling model for eddy covariance latent heat flux: estimating evapotranspiration of a subtropical seasonal evergreen broad-leaved forest as an example*. J Hydrol., 468-469, 101-110.
- Dengel S., Zona D., Sachs T., Aurela M., Jammot M., Parmantier F.J.W., Oechel W., Wesala T., 2013, *Testing the applicability of neural networks as a gap-filling method using CH4 flux data from high latitude wetlands*. Biogeosciences, 10, 8185-8200.
- Dutaur L., Cieslik S., Carrara A., Lopez A., 1999, *The detection of nonstationarity in the determination of deposition fluxes*. Proc. of EUROTRAC Symposium '98, t 2, WIT Press, Southampton, 171-176.
- Falge E., i in 2001a, *Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange*. Agric. For. Meteorol., 107, 43-69.
- Falge E., i in., 2001b, *Gap filling strategies for long term energy flux data sets*. Agric For Meteorol., 107, 71-77.
- Foken T., 2008, *Micrometeorology*. Springer, Berlin.
- Fortuniak K., 2003, *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*. Wyd. UŁ.
- Fortuniak K., 2010, *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*. Wyd. UŁ.
- Fortuniak K., Pawlak W., Bednorz L., Grygoruk M., Siedlecki M., Zieliński M., 2017, *Methane and carbon dioxide fluxes of temperate mire in Central Europe*. Agric For Meteorol., 232, 306-318.
- Grimmond C.S.B., Oke T.R., 1991, *An evapotranspiration-interception model for urban areas*. Water Resources Research. 27, 7, 1739-1755.
- Hui D., Wan S., Su B., Katul G., Monson R., Luo Y., 2004, *Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimation*. Agric. For. Meteorol., 121, 93-111.

- Matuszkiewicz A.J., 2004, *Roślinność nieleśna*. [W:] Banaszuk H. (red.) *Kotlina Biebrzańska i Biebrzański Park Narodowy. Aktualny stan, walory, zagrożenia i potrzeby czynnej ochrony środowiska*. Wyd. Ekonomia i Środowisko. Białystok.
- Mahrt L., 1998, *Flux sampling errors for aircraft and towers*. Jour. Atmospheric and Oceanic Technology, 15, 416-429.
- Moffat A.M. i in., 2007, *Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes*. Agric For Meteorol., 147, 209-232.
- Park J., Byun K., Choi M., Jang E., Lee J., Lee Y., Jung S., 2015, *Evaluation of statistical gap fillings for continuous energy flux (evapotranspiration) measurement for two different land cover types*. Stoch. Environ. Res. Risk Assess., 29, 2021-2035
- Papale D., 2012, *Data gap filling*. [W:] (red.) Aubert M., Vesala T., Papale D., *Eddy Covariance: A practical guide to measurement and data analysis. Partitioning of net fluxes*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 159-172.
- Richardson A.D., Hollinger D.Y., 2007, *A method to estimate the additional uncertainty in gap-filling NEE resulting from long gaps in the CO₂ flux record*. Agric. For. Meteorol., 147, 199-208.
- Sobczyk M., 1997, *Statystyka*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Ward H.C., Evans J.G., Grimmond C.S.B., 2013, *Multi-season eddy covariance observation of energy, water and carbon fluxes over a suburban area in Swindon, UK*. Atmos. Chem. Phys. 13. 4645-4666
- Webb K.F., Pearman G.I., Leuning R., 1980, *Correction of Flux Measurements for Density Effects due to Heat and Water Vapor Transfer*. Quart. Jour. of the Royal Met. Soc., 106, 85-100.

Streszczenie

W pracy przedstawiono porównanie wybranych metod uzupełniania luk w kowariancyjnych pomiarach turbulencyjnego strumienia ciepła utajonego (Q_e). Zastosowano metody: średniego dobowego przebiegu (MDV), metodę Penmana-Monteitha i regresji wielokrotnej. Badania przeprowadzono na podstawie serii wykonanych na trzech stanowiskach pomiarowych: obszar zurbanizowany, tereny bagienne i obszar rolniczy.

Wartości uzyskiwane z zastosowanych metod uzupełniania luk pomiarowych są dość zbliżone do tych z obserwacji, szczególnie w cieplej porze roku. Uzyskane wartości średniego błędu kwadratowego dla Q_e w obszarach bagiennych i terenach rolniczych zawiera się w przedziale od 26 do 55 W m⁻². W przypadku obszaru zurbanizowanego największą zgodnością cechują się wyniki z metody regresji wielokrotnej.

Słowa kluczowe: strumień ciepła utajonego, metoda kowariancji wirów, klimat pola uprawnego, klimat terenów zurbanizowanych, korekcja danych pomiarowych

Summary

In this study, three different methods were used to fill the gap in latent heat flux (Q_e) measurement. These methods were: mean diurnal variation (MDV), Penman-Monteith (P-M), multi regression (Regres). We used these methods to evaluate Q_e values from different land cover types: urban area, wetland area and agricultural area. The Q_e estimated by three different approaches was fairly close to the observed Q_e especially during the warm seasons. The values of root mean square error ranging from 26 to 55 W m⁻² at wetland and agricultural area. At urban area the best results showed the multi regression method.

Key words: latent heat fluxes, eddy covariance techniques, urban climate, agricultural field climatology

Mariusz Siedlecki

mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl

Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Łódzki

Włodzimierz Pawlak

wpawlak@uni.lodz.pl

Krzysztof Fortuniak

kfortun@uni.lodz.pl

Mariusz Zieliński

mariusz.r.zielinski@gmail.com

Zakład Ekorozwoju i Kształtowania Środowiska Geograficznego Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie