

**Urszula Somorowska, Mateusz Ślązek**

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

Zakład Hydrologii

e-mail: usomorow@uw.edu.pl

## **SEZONOWA ZMIENNOŚĆ EWAPOTRANSPIRACJI POTENCJALNEJ W ZLEWNI NIZINNEJ**

### **Seasonal variability of potential evapotranspiration in a lowland catchment**

**Słowa kluczowe:** ewapotranspiracja, model Penmana-Monteitha, MODIS, zlewnia nizinna

**Key words:** evapotranspiration, Penman-Monteith model, MODIS, lowland catchment

#### **WSTĘP**

Ewapotranspiracja jest jedną z najważniejszych składowych krążenia wody w ogniwie lądowym (Kossowska-Cezak, Bajkiewicz-Grabowska 2009), a przy tym jest to element stosunkowo trudny do ilościowego określenia (Sentelhas i in. 2010, Bogawski, Bednorz 2014). Zmienność czasowa i zróżnicowanie przestrzenne ewapotranspiracji, w tym ewapotranspiracji potencjalnej, są przedmiotem wielu prac z zakresu klimatologii i hydrologii, prowadzonych w ciągu ostatnich kilkunastu lat (m.in. Olechnowicz-Bobrowska 1978, Kędziora 1995, Jurak 1998, Jokiel 2007, Kowalik 2010, Łabędzki i in. 2012). W badaniach hydrologicznych znajomość ilości wody uczestniczącej w procesie ewapotranspiracji jest niezbędna m.in. w badaniach struktury bilansu wodnego zlewni. Badania ewapotranspiracji potencjalnej prowadzone ostatnio przez Bogawskiego i Bednorza (2016) dowiodły, że w latach 1971-2010 zaznaczył się istotny trend wzrostowy ewapotranspiracji potencjalnej w Polsce wyjaśniony wzrostem temperatury powietrza – maksymalnej i minimalnej, wzrostem usłonecznienia, a także spadkiem wilgotności względnej powietrza. W konsekwencji przypuszcza się, że przyszłe zmiany elementów klimatu mogą prowadzić do dalszych istotnych zmian w strukturze bilansu wodnego Polski, a w przypadku zlewni nizinnych – do wzrostu ewapotranspiracji kosztem zmniejszenia ich zasobów wodnych (Gutry-Korycka i in. 2014). Zatem pogląd o stosunkowo małej zmienności wieloletniej tej składowej obiegu wody w świetle obecnych badań nie znajduje już uzasadnienia. Z tego względu szacowanie ewapotranspiracji w zlewniach hydrologicznych wymaga dostosowania metod do po-

trzeb oceny zasobów wodnych, w teraźniejszych i przyszłych warunkach klimatu, z uwzględnieniem możliwości pozyskania stosownych danych.

Problem szacowania ewapotranspiracji występuje w modelowaniu hydrologicznym, w którym ocena ilościowa ewapotranspiracji jest etapem pośrednim w określeniu odpływu ze zlewni. Wyróżnia się dwie grupy metod szacowania ewapotranspiracji w modelach hydrologicznych (Zhao i in. 2013). W pierwszej grupie metod, tzw. metod cząstkowych (ang. *classification gathering methods*) oddzielnie szacuje się parowanie z powierzchni wody, parowanie gleby oraz transpirację roślin, a następnie sumuje się wartości cząstkowe w celu uzyskania ewapotranspiracji w zlewni. W drugiej grupie tzw. metod zintegrowanych (ang. *integrated conversion methods*) szacuje się ewapotranspirację potencjalną, natomiast ewapotranspirację aktualną oblicza się w funkcji ewapotranspiracji potencjalnej oraz aktualnego zapasu wody w strefie aeracji, odniesionego do zapasu wody w stanie połowej pojemności wodnej. Tę drugą grupę metod stosuje się w konceptualnych modelach hydrologicznych, m.in. w konceptualnym modelu HBV (Seibert, Vis 2012), wykorzystywanym m.in. w hydrologii operacyjnej, również w Polsce. Dobowe wartości ewapotranspiracji potencjalnej, oszacowane jako wartość średnia w zlewni, są wejściem do tego modelu.

Istnieje wiele metod oceny ewapotranspiracji potencjalnej, dających wyniki różniące się między sobą, co w konsekwencji wpływa na dokładność kalibracji modeli hydrologicznych oraz symulacji odpływu. Wybór metody zależy w dużej mierze od dostępności danych. Zalecaną i powszechnie stosowaną metodą obliczania ewapotranspiracji potencjalnej (wskaźnikowej) jest metoda Penmana-Monteitha (Kasperska-Wołowicz, Łabędzki 2004, Łabędzki i in. 2012). Na jej podstawie można charakteryzować meteorologiczne warunki procesu parowania i określać ewaporacyjną zdolność atmosfery w sytuacji nieograniczonego zasilania roślin i gleby w wodę. Model ten, w oryginalnej postaci, wymaga jednak danych meteorologicznych, pozyskiwanych na automatycznych stacjach synoptycznych. W praktyce można stosować uproszczone metody identyfikacji parametrów modelu Penmana-Monteitha w celu wyznaczenia dobowych wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej (Allen i in. 1998, Sentelhas i in. 2010).

Nowe możliwości identyfikacji ilości wody uczestniczącej w procesie ewapotranspiracji pojawiły się wraz z rozwojem technik satelitarnych (Dąbrowska-Zielińska 1995). Podstawową zaletą ich stosowania jest możliwość rozpoznania aktualnej struktury przestrzennej roślinności oraz możliwość szacowania uwilgotnienia siedlisk (Budzyńska i in. 2011), czynnika bezpośrednio wpływającego na proces ewapotranspiracji. Za szczególnie wartościowe i przydatne w hydrologii można uznać dane ewapotranspiracji potencjalnej (PET-MODIS) udostępniane w projekcie *MODIS Global Evapotranspiration*, opracowane według algorytmu wykorzystującego założenia modelu Penmana-Monteitha (Mu i in. 2007, 2011). Są to dane ewapotranspiracji potencjalnej o rozdzielczości przestrzennej 1 km, kodowane jako sumy 8-dniowe, miesięczne i roczne, dostępne od 2000 r. Danymi wejściowymi do obliczeń PET są dane satelitarne o interwale ośmiodniowym, obejmujące pokry-

cie terenu, wskaźnik roślinny LAI, albedo i promieniowanie słoneczne. Ponadto wykorzystywane są dobowe dane meteorologiczne, w tym: ciśnienie, temperatura i wilgotność powietrza oraz usłonecznienie. Wcześniej dane PET-MODIS były wielokrotnie porównywane z wartościami szacowanymi na podstawie pomiarów wykonywanych metodą kowariancji wirów (Tang i in. 2011, Kim i in. 2012, Velpuri i in. 2013, Ruhoff i in. 2013). Ostatnie prace potwierdzają fakt dobrze odwzorowania dynamiki ewapotranspiracji potencjalnej według PET-MODIS, z nieznaczną różnicą niedoszacowania względem metody Priesley-Taylor, którą obserwuje się w klimatach umiarkowanie wilgotnych (Miralles i in. 2016). Próba wykorzystania danych PET-MODIS w ocenie wielkości ewapotranspiracji potencjalnej w dużej zlewni nizinnej wydaje się zatem zasadna.

Celem pracy jest analiza sezonowej zmienności ewapotranspiracji potencjalnej (PET) w zlewni nizinnej Liwca, na podstawie danych MODIS. Zlewnia zajmuje powierzchnię 2761 km<sup>2</sup> i w dużym stopniu jest wykorzystywana w sposób rolniczy; około 48% powierzchni zajmują grunty orne, 13% - złożone systemy upraw i działek, 15% - łąki, 21% - lasy, 3% - tereny zabudowane. Uzyskane wartości średniej obszarowej ewapotranspiracji potencjalnej z danych MODIS porównano z wartościami obliczonymi według modelu Penmana-Monteitha, zgodnie z metodyką zalecaną przez FAO (Allen 1998), z wykorzystaniem naziemnych danych meteorologicznych.

## DANE I METODY

W pracy wykorzystano miesięczne sumy ewapotranspiracji potencjalnej (PET-MODIS) pozyskane z projektu *MODIS Global Evapotranspiration*, w celu analizy zmienności w latach 2001-2010. Oryginalnie dane są zapisane w formacie HDF w sinusoidalnym układzie odniesienia. Pobrane pliki przekształcono do formatu TIFF w programie ArcGIS 10.2, nadając im polski układ odniesienia (PUWG 1992). Należy podkreślić, że w przypadku zlewni o stosunkowo dużej powierzchni, jaką jest zlewnia Liwca, obserwacje satelitarne w średnich rozdzielczościach przestrzennych są na ogół wystarczające. Charakteryzują się bowiem dużą rozdzielczością czasową (informacja jest częsta), co umożliwia analizę dynamiki procesów w aspekcie zmienności sezonowej. Na podstawie wartości PET-MODIS zakodowanych w plikach rastrowych o jednokilometrowej rozdzielczości, oszacowano warstwę ewapotranspiracji potencjalnej w badanej zlewni nizinnej.

Sumy miesięczne i roczne ewapotranspiracji potencjalnej w zlewni nizinnej PET-MODIS porównano z wartościami PET obliczonej według równania Penmana-Monteitha, z wykorzystaniem danych naziemnych temperatury powietrza – maksymalnej, średniej i minimalnej oraz średniej dobowej prędkości wiatru. Dane te zostały udostępnione przez Niemiecką Służbę Pogody DWD (Brinkmann i in. 2015). Zasięgiem obejmują całą Europę. Zostały opracowane na podstawie informacji pochodzących ze stacji synoptycznych, w tym stacji zlokalizowanych w Pol-

sce. Należy podkreślić, że są to unikatowe dane o dużej rozdzielczości przestrzennej, opracowane w regularnej, pięciokilometrowej siatce gridowej, obejmujące lata 2001-2010. Do obliczenia wartości średnich dobowych PET w zlewni Liwca posłużyło 150 punktów gridowych. Dobowe wartości ewapotranspiracji potencjalnej, jako wartości skupione w zlewni, wyznaczono według metodyki zalecanej przez FAO (Allen i in. 1998), według następującego wzoru:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

gdzie:

$ET_o$  – ewapotranspiracja potencjalna ( $\text{mm} \cdot \text{doba}^{-1}$ );

$R_n$  – promieniowanie netto ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ),

$G$  – strumień ciepła w glebie ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ),

$T$  – średnia dobową temperaturę powietrza na wysokości 2m [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$u_2$  – prędkość wiatru na wysokości 2 m ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),

$e_s$  – maksymalna prężność pary wodnej (kPa),

$e_a$  – aktualna prężność pary wodnej (kPa),

$\Delta$  – tangens kąta nachylenia krzywej ciśnienia pary wodnej ( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),

$\gamma$  – stała psychrometryczna ( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

W obliczeniach przyjęto, że strumień ciepła w glebie ( $G$ ), ze względu na zerowy bilans dobowy, równy jest zero. Wartości stałej psychrometrycznej  $\gamma$  wyznacza się w funkcji ciśnienia atmosferycznego  $P$ , zależnego od wysokości  $z$  nad poziomem morza :

$$\gamma = 0,664742 \cdot 10^{-3} \cdot P = 0,664742 \cdot 0,1013 \cdot \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (2)$$

$P$  – ciśnienie atmosferyczne (kpa),

$z$  – wysokość (m n.p.m).

Obliczając ciśnienie pary nasyconej  $e^o(T)$  [kpa] przy danej temperaturze  $T$  według wzoru:

$$e^o(T) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad (3)$$

maksymalną prężność pary wodnej  $e_s$  wyznacza się jako średnią arytmetyczną z wartości ekstremalnych  $e^o(T_{max})$  oraz  $e^o(T_{min})$ :

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (4)$$

W przypadku braku danych wilgotności powietrza, aktualną prężność pary wodnej  $e_a$  można przybliżyć zakładając, że temperatura minimalna  $T_{min}$  jest wystarczającą estymatą dla temperatury punktu rosy  $T_{dew}$ , stąd:

$$e_a = e^o(T_{dew}) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}\right) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3}\right) \quad (5)$$

Tangens kąta nachylenia krzywej ciśnienia pary wodnej  $\Delta$  (kpa  $\cdot$   $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) jest obliczany w funkcji temperatury  $T$  zgodnie z zależnością:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (6)$$

Promieniowanie netto  $R_n$  będące różnicą pomiędzy dostarczanym do powierzchni promieniowaniem krótkofalowym  $R_{ns}$  a wypromieniowanym długofalowym  $R_{nl}$ , wyznacza się w kilku krokach. Na wstępie oblicza się promieniowanie na górnej granicy atmosfery  $R_a$ , w funkcji szerokości i długości geograficznej oraz kolejnego dnia roku. W przypadku braku danych usłonecznienia, promieniowanie słoneczne  $R_s$  można wyznaczyć na podstawie równania Hargreaves'a:

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \cdot R_a \quad (7)$$

gdzie:

$R_s$  – promieniowanie słoneczne ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ),

$R_a$  – promieniowanie na górnej granicy atmosfery ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ),

$k_{Rs}$  - współczynnik empiryczny, równy 0,16,

$T_{max}$  - temperatura maksymalna powietrza ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{min}$  - temperatura minimalna powietrza ( $^{\circ}\text{C}$ ).

i następnie można obliczyć bilans promieniowania krótkofalowego  $R_{ns}$  według wzoru:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (8)$$

gdzie:

$\alpha$  – albedo powierzchni parującej, przyjęte dla roślinności trawiastej jako równe 0,23.

Wypromieniowywanie długofalowe  $R_{nl}$  oblicza się na podstawie zależności:

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

gdzie:

$R_{nl}$  – wypromieniowywanie długofalowe  $R_{nl}$  ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ),

$\sigma$  – stała Stefana-Boltzmann stała ( $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ),

$T_{max,K}$  – temperatura maksymalna za dobę ( $^{\circ}\text{K}$ ),

$T_{min,K}$  – temperatura minimalna za dobę ( $^{\circ}\text{K}$ ),

$R_{so}$  – promieniowanie przy bezchmurnym niebie, przyjęte jako  $R_{so} = 0,75 R_a$

Ostatecznie, promieniowanie netto  $R_n$ , niezbędne w równaniu (1), oblicza się jako różnicę pomiędzy promieniowaniem krótkofalowym  $R_{ns}$ , a wypromieniowanym długofalowym  $R_{nl}$ :

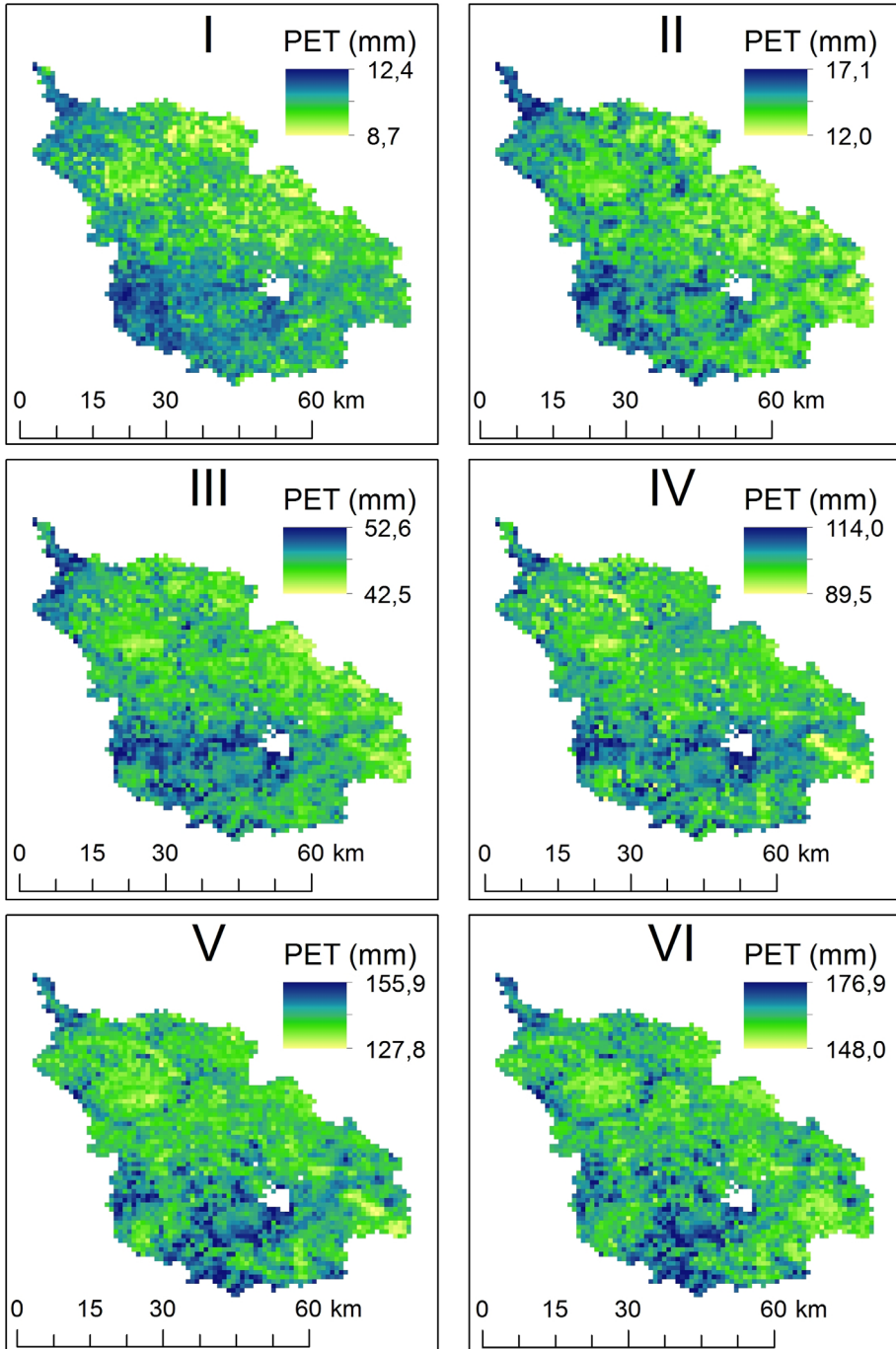
$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

W ten sposób dokonano identyfikacji liczbowej parametrów i zmiennych w modelu Penmana-Monteith'a, określonym równaniem (1). Wykorzystując dane z bazy DWD, przeprowadzono obliczenia ewapotranspiracji potencjalnej, jako wartości skupionej w zlewni, w dwóch wariantach: (1) z wykorzystaniem dobowych danych temperatury powietrza maksymalnej, średniej i minimalnej oraz prędkości wiatru (ciąg wartości oznaczony jako PET-TTT-W), oraz (2) z wykorzystaniem danych temperatury powietrza maksymalnej, średniej i minimalnej oraz przyjętej a priori średniej prędkości wiatru jako 2,2 m/s (ciąg wartości oznaczony jako PET-TTT). Wyniki porównano z wartościami średniej obszarowej ewapotranspiracji potencjalnej PET-MODIS.

## WYNIKI I DISKUSJA

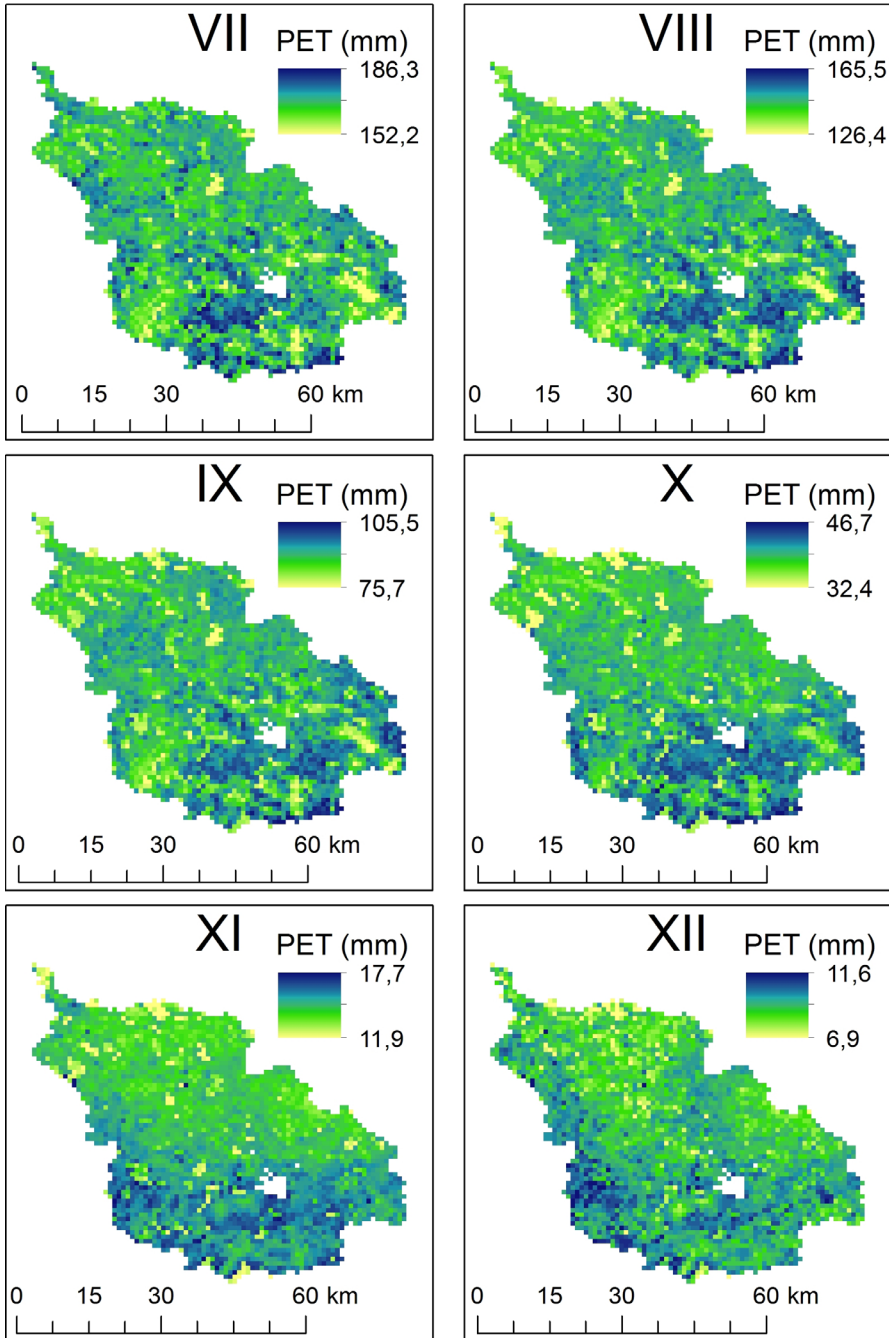
Na rycinach 1a i 1b przedstawiono przestrzenną i miesięczną zmienność ewapotranspiracji potencjalnej PET-MODIS w zlewni Liwca, w roku średnim okresu 2001-2010. W miesiącach zimowych, od listopada do lutego, wartości PET są stosunkowo niskie, rzędu kilkunastu mm. Od marca wzrastają, osiągając w lipcu ponad 150 mm. W sierpniu są już nieco niższe niż w lipcu i w kolejnych miesiącach stopniowo maleją, osiągając w październiku kilkadziesiąt mm. W badanej zlewni zauważalne jest przestrzenne zróżnicowanie wartości PET, dochodzące nawet do 160-180 mm od czerwca do sierpnia. Tak duże zróżnicowanie przestrzenne ewapotranspiracji potencjalnej PET-MODIS w zlewni jest wynikiem uwzględnienia w algorytmie parowania nie tylko zmiennych meteorologicznych, ale również rodzaju powierzchni parującej, poprzez wskaźnik ulistowienia LAI. Wraz z temperaturą powietrza i niedosytem wilgotności powietrza, wskaźnik LAI jest powiązany z opornością stomatyczną, charakteryzującą opory przepływu pary wodnej z wnętrza liścia do powietrza atmosferycznego. Jest to zależność o charakterze statystycznym (Kowalik 2010). Wartości oporności stomatycznej zależą od typów roślinności. Mozaika typów roślinności w zlewni Liwca wpływa na zróżnicowane przestrzennie wartości LAI, co ma bezpośredni wpływ na zaobserwowane zróżnicowanie przestrzenne wartości PET-MODIS.

Przebieg miesięcznych sum ewapotranspiracji potencjalnej w zlewni Liwca, według danych MODIS oraz według metodyki FAO, przedstawiono na rycinie 2. Wartości PET-MODIS regularnie przewyższają wartości PET-FAO. Zauważalna jest wyraźna cykliczność przebiegu PET w badanej zlewni, powtórzona we wszystkich trzech ciągach danych. Najwyższe wartości występują w miesiącach letnich – w czerwcu i lipcu, a najniższe – w listopadzie, grudniu, styczniu i lutym. Od stycznia do lipca wartości PET-MODIS rosną, osiągając w lipcu średnio 170 mm. Od sierpnia, w którym PET-MODIS kształtuje się na poziomie 150 mm, rozpoczyna się spadek wartości, osiągając w grudniu wartości rzędu 8 mm. Ekstremalnie



**Ryc. 1a.** Średnie miesięczne wartości ewapotranspiracji potencjalnej (PET-MODIS) w zlewni Liwca w miesiącach od stycznia do czerwca, w wieloleciu 2001-2010

**Fig. 1a.** Mean monthly potential evapotranspiration (PET-MODIS) in the Liwiec catchment in months between January and- June, in years 2001-2010

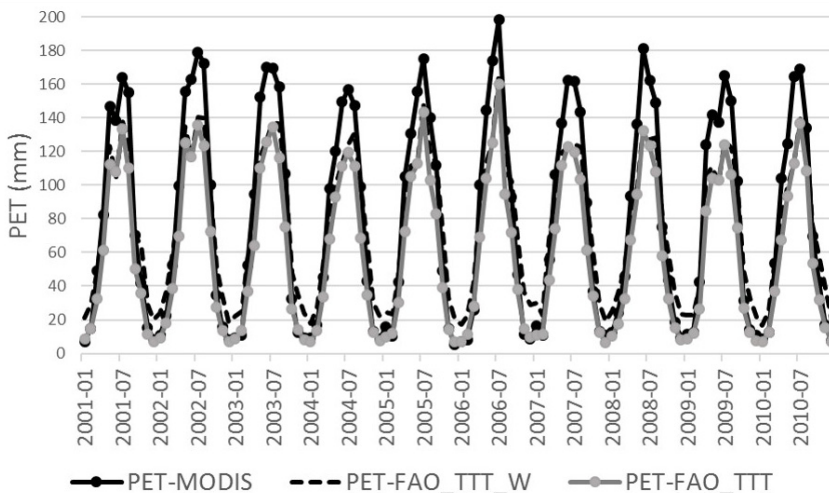


**Ryc. 1b.** Średnie miesięczne wartości ewapotranspiracji potencjalnej (PET-MODIS) w zlewni Liwca w miesiącach od lipca do grudnia, w wieloleciu 2001-2010

**Fig. 1b.** Mean monthly potential evapotranspiration (PET-MODIS) in the Liwiec catchment in months between July and- December, in years 2001-2010

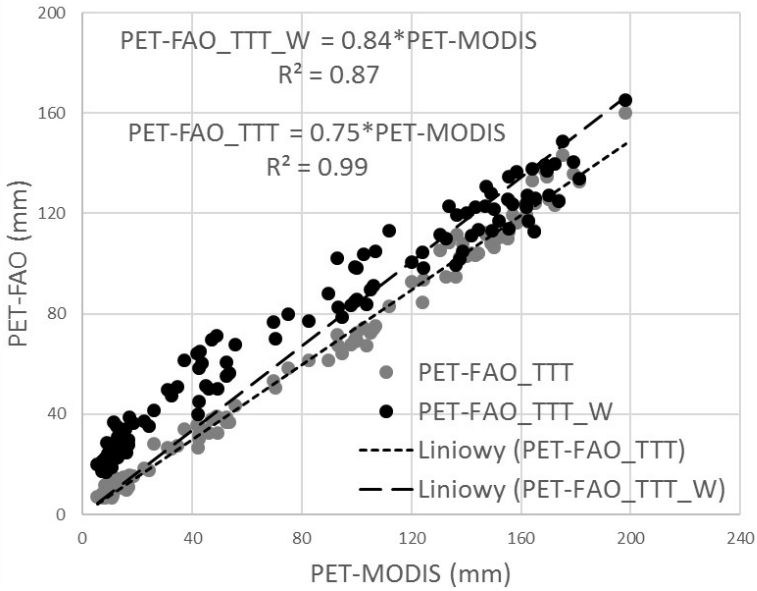


wysoką miesięczną sumę PET-MODIS (198 mm) odnotowano w lipcu 2006 r., który był miesiącem skrajnie suchym i ekstremalnie ciepłym (Lorenc i in. 2008). Przyczyną były wielodniowe fale upałów, które wystąpiły od połowy czerwca do 30 lipca 2006 r., z maksymalną temperaturą powietrza przekraczającą 30°C oraz z rekordowymi sumami usłonecznienia, przekraczającymi maksima 30-letnie. Minimalne sumy miesięczne, rzędu 7-10 mm pojawiały się regularnie w ciągu całego badanego okresu w grudniu i styczniu. Na uwagę zasługuje zgodność przebiegu trzech analizowanych ciągów danych. Charakterystyczna jest sezonowa zmienność wartości PET, powtarzająca się regularnie co roku. Wysokie wartości promieniowania słonecznego oraz temperatury powietrza w miesiącach letnich (czerwiec-lipiec-sierpień) wpływają na występowanie właśnie w tych miesiącach maksymalnych wartości PET. Przebieg wartości miesięcznych PET obliczonych trzema metodami jest zbliżony, jednakże występują różnice w wielkości ich oszacowania. Wysoka korelacja zachodzi między sumami miesięcznymi PET-MODIS i PET-FAO\_TTT, ale PET-FAO\_TTT jest niedoszacowana względem PET-MODIS średnio o 25% (ryc. 3). Mniejsze różnice występują między PET-MODIS i PET-FAO\_TTT\_W; różnica niedoszacowania w tym przypadku wynosi średnio 16%. O ile wartości maksymalne PET-FAO\_TTT\_W są zbliżone do PET-FAO\_TTT, to w miesiącach zimowych wartości PET-FAO\_TTT\_W przewyższają zarówno PET-FAO\_TTT, jak i PET-MODIS. Analizując sumy roczne, najbardziej zbliżone do PET-MODIS są wartości PET-FAO\_TTT\_W (ryc. 4). Przeciętne sumy



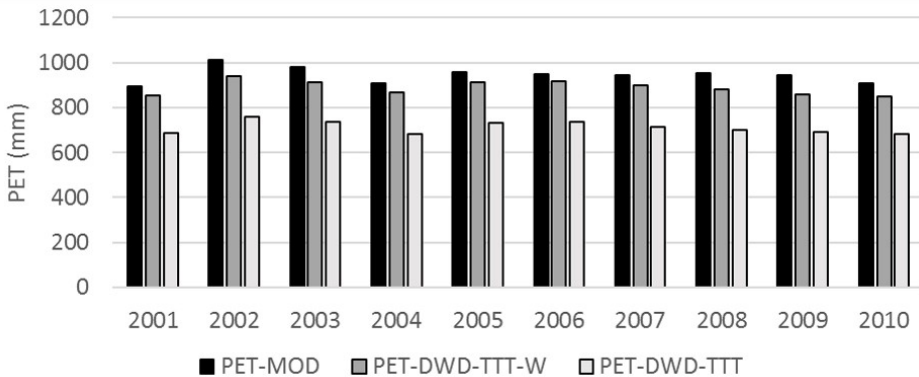
**Ryc. 2.** Przebieg miesięcznych sum ewapotranspiracji potencjalnej w zlewni Liwca, według danych MODIS (PET-MODIS) oraz według metodyki FAO (PET-FAO)

**Fig. 2.** Monthly sums of potential evapotranspiration in the Liwiec catchment, according to the MODIS data (PET-MODIS) and based on the FAO methodology (PET-FAO)



**Ryc. 3.** Zależność między wartościami PET według danych MODIS (PET-MODIS) oraz według metody FAO

**Fig. 3.** Relationship between the PET values according to the MODIS data (PET-MODIS) and the FAO method



**Ryc. 4.** Roczne sumy ewpotranspiracji potencjalnej w zlewni Liwca w latach 2001-2010, według danych MODIS (PET-MODIS) oraz według metody FAO (PET-FAO)

**Fig. 4.** Annual sums of potential evapotranspiration in the Liwiec catchment in years 2001-2010, according to the MODIS data (PET-MODIS) and based on the FAO method

roczne ewapotranspiracji potencjalnej wyniosły 944 mm (PET-MODIS), 889 mm (PET-FAO\_TTT\_W) oraz 711 mm (PET-FAO\_TTT). Są to wartości znacznie wyższe od średniej wieloletniej okresu 1951-2000, obliczonej przez Jokiela (2007) metodą Thornthwaite'a dla Łodzi, która wyniosła 633 mm.

Jak wspomniano we wstępie, wartości PET-MODIS były wielokrotnie porównywane i pozostawały w dużej zgodności z wartościami PET obliczonymi metodą kowariancji wirów na podstawie szczegółowych pomiarów naziemnych. Takie pomiary są wykonywane z wykorzystaniem systemów pomiarowych złożonych z wiatromierzy, analizatorów pary wodnej, sensorów temperatury powietrza i gleby, czujników promieniowania krótko- i długofalowego, deszczomierzy i czujników ciepła glebowego. Mierniki te są montowane w układach pozwalających stosunkowo dokładnie określić przepływ masy i energii w obrębie analizowanego obszaru. W związku z tym, w niniejszej pracy wartości ewapotranspiracji potencjalnej w zlewni Liwca uzyskane z danych MODIS można uznać za reperowe, a szacunki PET dokonane według uproszczonego modelu Penmana-Monteitha, przy ograniczonej liczbie danych meteorologicznych, należy uznać za systematycznie niższe od PET-MODIS, i w konsekwencji niedoszacowane.

## WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń ewapotranspiracji potencjalnej z wykorzystaniem danych MODIS (PET-MODIS) są porównywalne pod względem sezonowości występowania ekstremów z wynikami otrzymanymi uproszczoną metodą Penmana-Monteitha (PET-FAO), zgodnie z metodyką zalecaną przez FAO. Jednakże wartości uzyskane metodą uproszczoną są niedoszacowane. Średnia wielkość niedoszacowania, w przypadku sum miesięcznych wynosi od 16 do 25%.

Z tego względu, w przypadku braku szczegółowych danych meteorologicznych, a zarazem konieczności oszacowania ewapotranspiracji potencjalnej w zlewniach o dużej powierzchni wydaje się zasadne korzystanie z szacunków PET, dokonywanych na podstawie informacji pozyskiwanej metodami teledetekcyjnymi. Pozwalają one uchwycić zmienne w czasie zróżnicowanie przestrzenne cech powierzchni parującej, a tym samym dokładniej niż w punkcie oszacować wielkość PET. Przykładem takich danych są wykorzystane w tej pracy wartości ewapotranspiracji pozyskane z projektu *MODIS Evapotranspiration*. Przedmiotem dalszych studiów hydrologicznych powinna być próba zastosowania opracowanych danych w modelu konceptualnym.

## Literatura

Allen R.G, Pereira L., Raes D, Smith M., 1998, Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.

- Bogawski P., Bednorz E., 2014, Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe), *Water Resources Management*, 28, 5021-5038.
- Bogawski P., Bednorz E., 2016, Atmospheric conditions controlling extreme summertime evapotranspiration in Poland (central Europe), *Natural Hazards*, 81, 55-69.
- Brinckmann S., Krähenmann S., Bissolli P., 2015, High-resolution daily gridded datasets of air temperature and wind speed for Europe, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 8, 649-702.
- Budzyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., Turlej K., Małek I., Bartold M., 2011, Monitoring przyrodniczy bagien biebrzańskich z zastosowaniem teledetekcji, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 3 (35), 39-46.
- Dąbrowska-Zielińska K., 1995, Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA, *Prace Geograficzne IGiPZ PAN*, 165, ss. 111.
- Gutry-Korycka M., Sadurski A., Kundzewicz Z. W., Pociask-Karteczka J., Skrzypczyk L., 2014, Zasoby wodne a ich wykorzystanie, *Nauka*, 1, 77-98.
- Jokiel P., 2007, Zmiany, zmienność i ekstremalne sumy parowania terenowego i ewapotranspiracji potencjalnej w Łodzi w drugiej połowie XX wieku, *Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica*, 8, 63-88.
- Jurak D., 1998, Przestrzenny i czasowy rozkład parowania potencjalnego w Polsce, *Wiadomości IMGW*, 3.
- Kasperska-Wołowicz W., Łabędzki L., 2004, Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 4, 2a (11), 123-136.
- Kędziora A., 1995, Podstawy agrometeorologii, Poznań, PWRiL.
- Kim H. W., Hwang K., Mu Q., Lee S. O., Choi M., 2012, Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia, *KSCE J. Civ. Eng.*, 16, 229-238.
- Kossowska-Cezak U., E. Bajkiewicz-Grabowska, 2009, Podstawy hydrometeorologii, Wyd. Naukowe PWN.
- Kowalik P., 2010, Agrohdrologia obliczeniowa, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, 33.
- Lorenc H., Mierkiewicz M., Sasim M., 2008, Susze w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem roku 2006, *Wiadomości IMGW*, 2, 1-2, 3-32.
- Łabędzki L., Bąk B., Kanecka-Geszke E. 2012. Wielkość i zmienność ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana-Monteitha w okresie wegetacyjnym w latach 1970–2004 w wybranych rejonach Polski. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 2 (38), 159-170.
- Miralles, D.G., Jiménez, C., Jung, M., Michel, D., Ershadi, A., McCabe, M.F., Hirschi, M., Dolman, A.J., Fisher, J.B., Martens, B., Mu, Q., Seneviratne, S.I., Weber, U., Wood, E.F., & Fernández-Prieto, D. (2016). The WACMOS-ET project –Part 2: Evaluation of global land evaporation data sets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 823-842
- Mu Q., Heinsch F. A., Zhao M. and Running S. W., 2007, Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data”, *Remote Sens. Environ.*, 111, 519-536.

- Mu Q., Zhao M., Running S.W., 2011, Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781-1800.
- Olechnowicz-Bobrowska B., 1978, Parowanie potencjalne w okresie wegetacyjnym w Polsce. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozpr. Hab.*, 67, ss. 173.
- Ruhoff A. L., 2013, Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin”, *Hydrol. Sci. J.*, 58, 8, 1658-1676.
- Seibert J., Vis, M., 2012, Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325.
- Sentelhas P., Gillespie T., Santos E., 2010, Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97(5), 635-644.
- Tang R. L., Li Z.-L., Chen K. S., 2011, Validating MODIS-derived land surface evapotranspiration with in situ measurements at two AmeriFlux sites in a semiarid region”, *J. Geophys. Res.*, 116, no. D4, D4106.
- Velpuri N.M., Senay G.B., Singh R.K., Bohms S., Verdin J.P., 2013, A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: Using point and gridded FLUXNET and water balance ET, *Remote Sens. Environ.*, 139, 35-49.
- Zhao L., Xia J., Xu C, Wang Z, Sobkowiak L., Long C., 2013, Evapotranspiration estimation methods in hydrological models, *J. Geogr. Sc.*, 23(2), 359-369.

### Summary

Evapotranspiration is the main component of hydrological water cycle at a catchment scale. However it is difficult to estimate the amount of water participating in this process. The issue of estimating the potential evapotranspiration is important from the point of view of hydrological modelling. In this paper we analyzed the potential evapotranspiration at a scale of a large lowland catchment of the Liwiec River in Poland. Data from the MODIS Global Evapotranspiration (PET-MODIS) were used in the analysis covering the period 2001-2010. Monthly and yearly estimates of the PET-MODIS at a catchment scale were compared to the values calculated by the simplified Penman-Monteith equation, according to the FAO methodology, using limited data of air temperature and wind speed. Results have shown that monthly PET-FAO calculated by the simplified Penman-Monteith equation, with limited meteorological data are underestimated with regards to PET-MODIS. In case of large catchments it is recommended to use in hydrological models such estimates as PET-MODIS, rather than PET values.