

Urszula SOMOROWSKA
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
e-mail: usomorow@uw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-9861-5107

CZASOWA ZMIENNOŚĆ I PRZESTRZENNE ZRÓŻNICOWANIE EWAPOTRANSPIRACJI W ZLEWNI NIZINNEJ RZEKI ŁASICY

Spatial-temporal patterns of evapotranspiration in the Łasica catchment

Abstract: Accurate quantification of evapotranspiration is necessary for understanding the water cycle at a local scale. At catchment scale, evapotranspiration might be approximated using remote sensing data useful in spatial-temporal analyses. In this study, the long-term and seasonal variability of evapotranspiration in the Łasica River catchment in the years 2003–2020 was assessed on the basis of data acquired from the SSEBop project (*Operational Simplified Surface Energy Balance*). Additionally, using the index of precipitation utilization (WWO), the degree of precipitation consumption for the water demands of plants was determined. The highest evapotranspiration occurs in forest areas, slightly lower in marshy belts covered with meadow vegetation, and the lowest in agricultural areas and anthropogenically transformed areas. The spatial differentiation of evapotranspiration is particularly marked during the growing season, from April to October. Mean annual evapotranspiration sum is 403 mm, of which 96% falls on the growing season. Extremely low annual ET sums occurred in 2015 (329 mm), 2019 (342 mm) and 2003 (384 mm), while particularly high - in 2010 (455 mm) and 2013 (447 mm). In dry years, WWO is even 71–77%, while in particularly wet years, WWO is much lower and amounts to 54–58%.

Key words: actual evapotranspiration, temporal variability, spatial differentiation, SSEBop, Kampinos Forest

WSTĘP

Proces ewapotranspiracji jest istotnym ogniwem globalnego cyklu hydrologicznego, w wyniku którego około 61% objętości opadu nad powierzchnią lądową powraca do atmosfery (Rodell i in. 2015). W odniesieniu do terytorium Polski wartość ta jest jeszcze wyższa i stanowi około 76% wielkości opadu atmosferycznego w dorzeczu Odry, oraz 78% w dorzeczu Wisły (Gutry-Korycka, Jokiel 2017). W skali zlewni hydrologicznych wielkość ta może być bardzo zróżnicowana przestrzennie, będąc zależna od lokalnych cech klimatu oraz cech fizjograficznych. Szczególną rolę w kształtowaniu ewapotranspiracji odgrywają zasoby wilgoci glebowej decydujące o dostępności wody dla roślin. Równie istotnym czynnikiem jest typ pokrycia terenu, w tym rodzaj szaty roślinnej, od której zależy dynamika i sezonowość procesu transpiracji (Peel i in. 2010). Znajomość ilości wody uczestniczącej w procesie ewapotranspiracji w zlewniach rzecznych jest istotnym elementem projektowania, rozwoju i monitorowania systemów hydrologicznych, rolniczych i środowiskowych, przydatnych w planowaniu

Wpłynęło: 27.09.2021

Zaakceptowano: 10.11.2021

Zalecany sposób cytowania / Cite as: Somorowska U., 2021, Czasowa zmienność i przestrzenne zróżnicowanie ewapotranspiracji w zlewni nizinnej rzeki Łasicy, *Prace i Studia Geograficzne*, 66.3, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 35–46, DOI: 10.48128/pisg/2021-66.3-03.

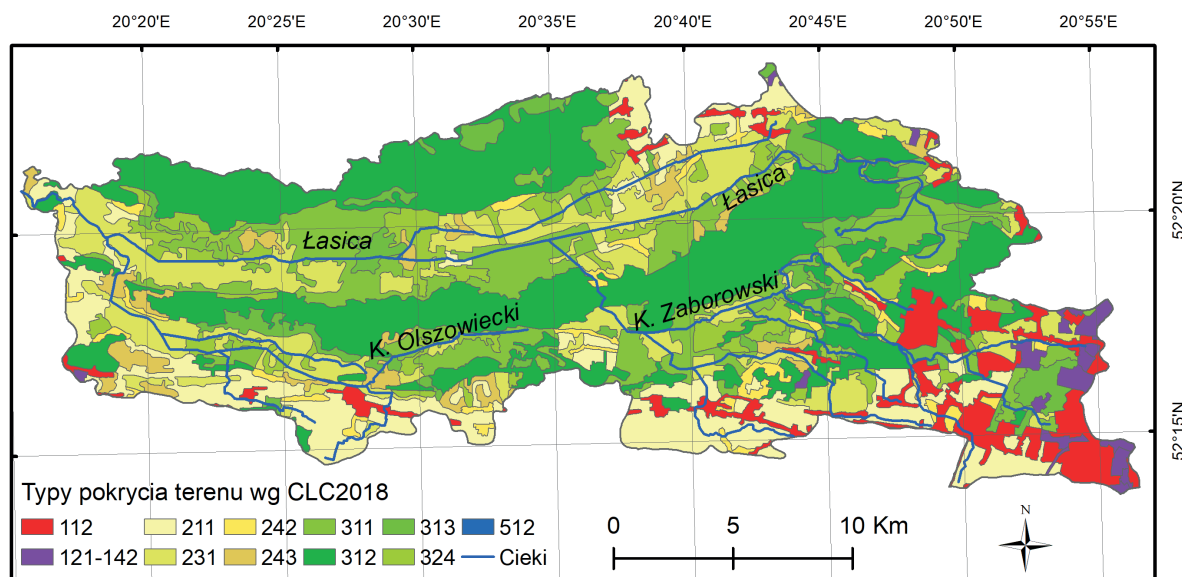
gospodarki wodnej. Służy temu ilościowa ocena wymiany masy i energii między powierzchnią ziemi a atmosferą. Szczególnie istotne jest rozpoznanie dynamiki obiegu wody w obszarach chronionych o cennych walorach przyrodniczych.

Kwantyfikacja tej ważnej składowej cyklu hydrologicznego jest jednak niezmiernie trudna. Terenowe pomiary lizymetryczne oraz metody bilansowe umożliwiają dokładne punktowe oszacowanie tej wielkości, jednakże brak gęstej sieci pomiarowej powoduje, iż coraz częściej wykorzystywane są techniki pośrednie umożliwiające analizy przestrzenne. Tradycyjnie, wartości ewapotranspiracji aktualnej obliczane są w bilansowych modelach hydrologicznych przy użyciu metod cząstkowych (ang. *classification gathering methods*) lub metod zintegrowanych (ang. *integrated conversion methods*) (Zhao i in. 2013). W metodach cząstkowych oddzielnie szacuje się parowanie gleby oraz transpirację roślin, a następnie sumuje się wartości cząstkowe w celu uzyskania ewapotranspiracji w zlewni. Stosując metody zintegrowane, w pierwszym etapie szacuje się ewapotranspirację potencjalną lub wskaźnikową, natomiast ewapotranspirację aktualną oblicza się na podstawie ewapotranspiracji potencjalnej (lub wskaźnikowej) oraz aktualnego zapasu wody w strefie aeracji, odniesionego do zapasu wody w stanie połowej pojemności wodnej. Podejście zintegrowane jest przykładowo stosowane w hydrologicznym modelu HBV relacji opad-odpływ (Seibert, Vis 2012). Ewapotranspirację aktualną można również oszacować diagnostycznie z wykorzystaniem technik satelitarnych na podstawie temperatury powierzchni parującej (ang. *Land Surface Temperature, LST*) stosując podejście określane mianem bilansu energetycznego (ang. *energy balance approach*). Na podstawie równania bilansu promieniowania powierzchni czynnej wyznaczany jest strumień ciepła utajonego (ang. *latent heat, LE*), który służy do wyznaczenia wielkości parowania (Senay i in. 2020). Metoda bilansu energetycznego (ang. *Operational Simplified Surface Energy Balance*) stosowana jest m.in. w projekcie SSEBop (ang. *Simplified Surface Energy Balance*), w ramach którego udostępniane są miesięczne wartości ewapotranspiracji aktualnej w rozdzielczości przestrzennej 1 km, począwszy od roku 2003 (Senay i in. 2013). Dzięki temu możliwe są analizy czasowe i przestrzenne ewapotranspiracji w mezoskali, obejmującej zlewnie rzędu kilkuset kilometrów kwadratowych. Jest to unikatowy zbiór danych wieloletnich, udostępnianych w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Ponadto dane te są zweryfikowane na podstawie pomiarów polegających na pomiarze strumieni masy i energii wymienianych pomiędzy ekosystemem a atmosferą, wykonywanych w skali ekosystemów (Senay i in. 2020). Jednocześnie rozdzielczość przestrzenna danych SSEBop jest dużo wyższa niż ta uzyskiwana w globalnych modelach hydrologicznych powierzchni ziemi; przykładowo, dane pochodzące z reanaliz klimatycznych ERA5-Land mają rozdzielczość około 10-krotnie mniejszą (Muñoz-Sabater i in. 2021). Stąd próba wykorzystania danych SSEBop w ocenie ewapotranspiracji aktualnej w mezoskalowej zlewni nizinnej Łasicy wydaje się zasadna.

Jedną z pierwszych prac dotyczących oszacowania wielkości ewapotranspiracji w zlewni rzeki Łasicy dotyczyła wyłącznie wartości skupionej, obliczanej jako średnia dla zlewni (Soczyńska i in., 2003). Były to szacunki określone metodą zintegrowaną dla wielolecia 1951–2000. Nieco późniejsza praca dotyczyła lat 2001–2008, w której również zastosowano metodę zintegrowaną (Somorowska i in. 2011). Równoległe, podjęto prace nad przestrzenną zmiennością ewapotranspiracji z wykorzystaniem danych z projektu MODIS (Mu i in. 2011), lecz okres obserwacji był równie krótki i ograniczał się do lat 2001–2008 (Somorowska 2011). Stąd celowe staje się podjęcie dalszych prac identyfikujących zmienne czasowo i przestrzennie ilości wody biorące udział w tym procesie, w jak najdłuższym okresie obejmującym lata suche, normalne i wilgotne. W związku z tym, że dane MODIS V.6.1 będą dostępne dopiero z w końcu 2021 roku, w niniejszej pracy wykorzystuje się dane diagnostyczne SSEBop.

Celem pracy jest analiza sezonowej i wieloletniej zmienności ewapotranspiracji aktualnej w bagiennej zlewni nizinnej rzeki Łasicy, położonej na terenie Puszczy Kampinoskiej. Jest to jeden z najbardziej unikatowych terenów mokradłowych w Polsce, charakteryzujący się równoleżnikowym układem pasowym – naprzemiennie występującymi pasami wydmy i bagien (Ryc. 1). Cenne ekosystemy leśne obejmują bory sosnowe rosnące na piaszczystych wydmach oraz lasy liściaste (olsy i łęgi) występujące głównie na bagnach. Pasy wydmy przedzielone są nisko położonymi pasami bagiennymi, w których dominują bagienne łąki z płytko występującą wodą podziemną. Zlewnia Łasicy po ujściu do Bzury zajmuje powierzchnię 504 km² i w dużym stopniu jest zalesiona. Według danych CORINE Land Cover 2018, uzyskanych z projektu

Copernicus Land Monitoring Service (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>), 30% powierzchni zajmują lasy iglaste (typ 312), 15% – lasy liściaste (typ 311), 5% – lasy mieszane (typ 313), 7% – lasy w stanie zmian (typ 324), 13% – grunty orne (typ 211), 3% – złożone systemy upraw i działek (typ 242), 15% – łąki (typ 231), 3% – tereny rolnicze z dużym udziałem roślinności naturalnej (typ 243), 9% – zabudowa luźna (typ 112) oraz tereny przemysłowe lub handlowe (typ 121).



Ryc. 1. Typy pokrycia terenu według CORINE Land Cover 2018 w zlewni rzeki Łasicy: 112 – zabudowa luźna, 121–142 – strefy przemysłowe lub handlowe, drogi i koleje, lotniska, miejskie tereny zielone oraz tereny sportowe i wypoczynkowe, 211 – nienawadniane grunty orne, 231 – łąki, 242 – złożone systemy upraw i działek, 243 – tereny rolnicze z dużym udziałem roślinności naturalnej, 311 – lasy liściaste, 312 – lasy iglaste, 313 – lasy mieszane, 324 – lasy w stanie zmian; 512 – wody

Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Land Cover according to the Corine Land Cover 2018 in the Łasica River catchment: 112 – discontinuous urban fabric, 121–142 – industrial or commercial units, road and rail networks, airports, green urban areas and sport, and leisure facilities, 211 – non-irrigated arable land, 231 – pastures, 242 – complex cultivation patterns, 243 – land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation, 311 – broad-leaved forest, 312 – coniferous forest, 313 – mixed forest, 324 – transitional woodland-shrub; 512 – water bodies

Source: authors' own elaboration

DANE I METODY

W pracy wykorzystano miesięczne sumy ewapotranspiracji aktualnej pozyskane z projektu SSEBop dla lat 2003–2020 (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/460>). Oryginalnie, dane są zapisane w formacie TIFF w systemie odniesienia WGS-84. Pobrane pliki przekształcono w programie ArcGIS 10.8.1, nadając im polski układ współrzędnych (PUWG-1992). Zbiory rastrowe o jednokilometrowej rozdzielczości zostały następnie ograniczone do granicy zlewni. Należy podkreślić, że w przypadku zlewni o stosunkowo dużej powierzchni, jaką jest zlewnia Łasicy, dane w średnich rozdzielczościach przestrzennych są na ogół wystarczające. Podstawową ich zaletą jest stosunkowo długi okres obserwacji, umożliwiającą analizę ewapotranspiracji w latach o różnej wilgotności. Duża rozdzielczość czasowa (informacja jest częsta) umożliwia analizę dynamiki procesów w aspekcie zmienności sezonowej. Pozyskany zbiór danych miesięcznych objął 216 podzbiorów rastrowych, po 12 w każdym z 18 analizowanych lat. Na tej podstawie określono wartości średnie w analizowanym wieloleciu, stosując miesięczny, a także roczny krok czasowy. Opracowano mapy zróżnicowania przestrzennego

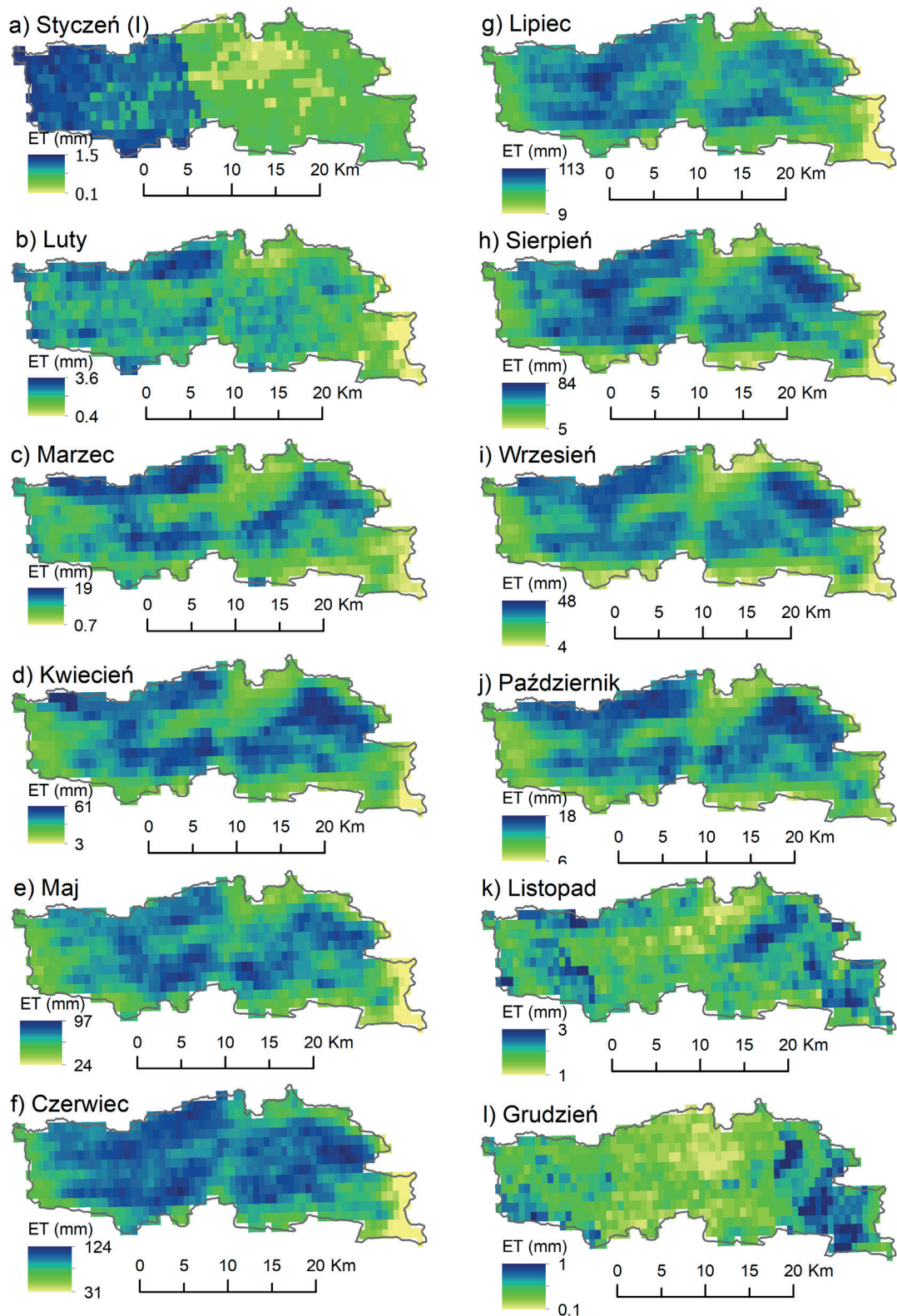
ewapotranspiracji aktualnej (ET) w zlewni w poszczególnych miesiącach i latach, dostosowując skalę barw do zakresu ET każdej mapy. Wyznaczono również wartości średnie miesięczne i roczne (wieloletnie) dla całej zlewni. Ponadto analizowano ET w różnych typach pokrycia terenu jako wartości średnie w wieloleciu w układzie sezonowym, z miesięcznym krokiem czasowym.

Niezależnie, pozyskano dane gridowe opadu atmosferycznego pochodzące z bazy G2DC-PL+ (Piniński i in. 2020). Mają one dwukilometrową rozdzielczość przestrzenną i zostały przygotowane w układzie współrzędnych 1992. W pracy wykorzystano sumy roczne opadów atmosferycznych udostępnione w zbiorach w formacie GeoTIFF. Zbiory rastrowe zostały ograniczone do granicy zlewni i na tej podstawie obliczono wartości skupione w zlewni. Następnie, dla wszystkich lat analizowanego wielolecia określono współczynnik wykorzystania opadu (WWO) przez rośliny. W pracy przyjęto, że jest to stosunek ewapotranspiracji aktualnej do opadu zmierzzonego (P), co można wyrazić następującym wzorem: $WWO = (ET/P) \times 100\%$. W takim ujęciu WWO odzwierciedla stopień wykorzystania wody opadowej przez rośliny.

WYNIKI I DYSKUSJA

Na rycinie 2. przedstawiono przestrzenne zróżnicowanie, obliczonych dla wielolecia, średnich miesięcznych sum ewapotranspiracji aktualnej w analizowanej zlewni. W miesiącach zimowych, od listopada do lutego (Ryc. 2ab i Ryc. 2kl), sumy ET są niskie, zaledwie kilkanaście milimetrów. Od marca (Ryc. 2c) wzrastają, osiągając w czerwcu nawet ponad 120 mm (Ryc. 2f). W lipcu są już nieco niższe niż w czerwcu i w kolejnych miesiącach stopniowo maleją, osiągając w październiku ponownie kilkanaście milimetrów. W zlewni zauważalne jest wyraźne zróżnicowanie przestrzenne ET, a wartości najwyższe w miesiącach od czerwca do sierpnia osiągają nawet 80–120 mm. Duże zróżnicowanie ET jest wynikiem mozaiki różnych typów roślinności oraz antropogenicznych form użytkowania terenu. Charakterystyczną cechą jest szczególnie niska ET w obrębie antropogenicznych form użytkowania terenu; dotyczy to typów CLC112 oraz CLC121-142.

Średnie wieloletnie (2003–2020) sumy miesięczne ET uzyskane dla całej zlewni przedstawiono na rycinie 3. W miesiącach od marca do czerwca wartości ET wzrastają od 10 mm do 104 mm (Ryc. 3a). Następnie stopniowo maleją, osiągając w październiku 13 mm. W okresie wegetacyjnym, od kwietnia do października, suma ewapotranspiracji osiąga 387 mm, co stanowi 96% średniej rocznej, wynoszącej 403 mm. Jednakże w poszczególnych latach występują wyraźne odstępstwa od średnich wieloletnich, zarówno w aspekcie średnich miesięcznych (Ryc. 3a), a także w aspekcie rocznych kumulowanych (Ryc. 3b). Najwyższe roczne wartości ET wystąpiły w latach 2010, 2013 i 2017 (odpowiednio 455 mm, 447 mm i 438 mm, co stanowi 113%, 111% i 109% średniej wieloletniej), natomiast najniższe – w latach 2015 i 2019 (odpowiednio 329 mm i 342 mm, co stanowi 82% i 85% średniej wieloletniej). Tak duże różnice ET wynikają z odmiennego zasilania zlewni opadem atmosferycznym, a w konsekwencji z dostępności wilgoci glebowej w poszczególnych latach. Lata 2010, 2013 i 2017 charakteryzowały się stosunkowo wysokimi opadami, które kolejno wyniosły 843 mm, 733 mm i 815 mm, stanowiąc 134%, 117% oraz 130% średniej wieloletniej. Natomiast lata 2015 i 2019 odznaczały się wyjątkowo niskimi opadami, które wyniosły odpowiednio 69% i 82% średniej wieloletniej. Należy zaznaczyć, że rok 2018 był również stosunkowo suchy; opad roczny nie przekroczył 83% średniej wieloletniej, a więc w tym wypadku ET w 2019 r. była efektem dwuletniego deficytu opadu. Dodatkowym czynnikiem determinującym występowanie ekstremalnych susz w tych latach była wyjątkowo wysoka temperatura powietrza. Susze letnie 2015, 2018 i 2019 roku dotknęły dużą część Polski, w tym Polskę środkową, i były najdotkliwsze od 2003 roku (Hari i in. 2020). Średnia miesięczna wartość temperatury powietrza przekraczała 95 percentyl w odniesieniu do okresu referencyjnego 1981–2010 (IMGW-BIP- BPSHM, 2019). Warto wspomnieć, że rok 2014 również był wyjątkowo ciepły, natomiast 2016 – bardzo ciepły (IMGW-PIB-BMKP, 2019). W konsekwencji, przestrzenne zróżnicowanie sum rocznych ET w zlewni w poszczególnych latach znacznie odbiegało od wartości średnich wieloletnich (Ryc. 4a). W latach wilgotnych 2010 i 2017 maksymalne sumy roczne ET (lokalnie obserwowane) sięgały odpowiednio 607 mm i 594 mm (Ryc. 4bd), natomiast w latach suchych wartości te były znacznie niższe i wyniosły 557 mm w 2015 r. (Ryc. 4c) i 528 mm w 2019 r. (Ryc. 4e).

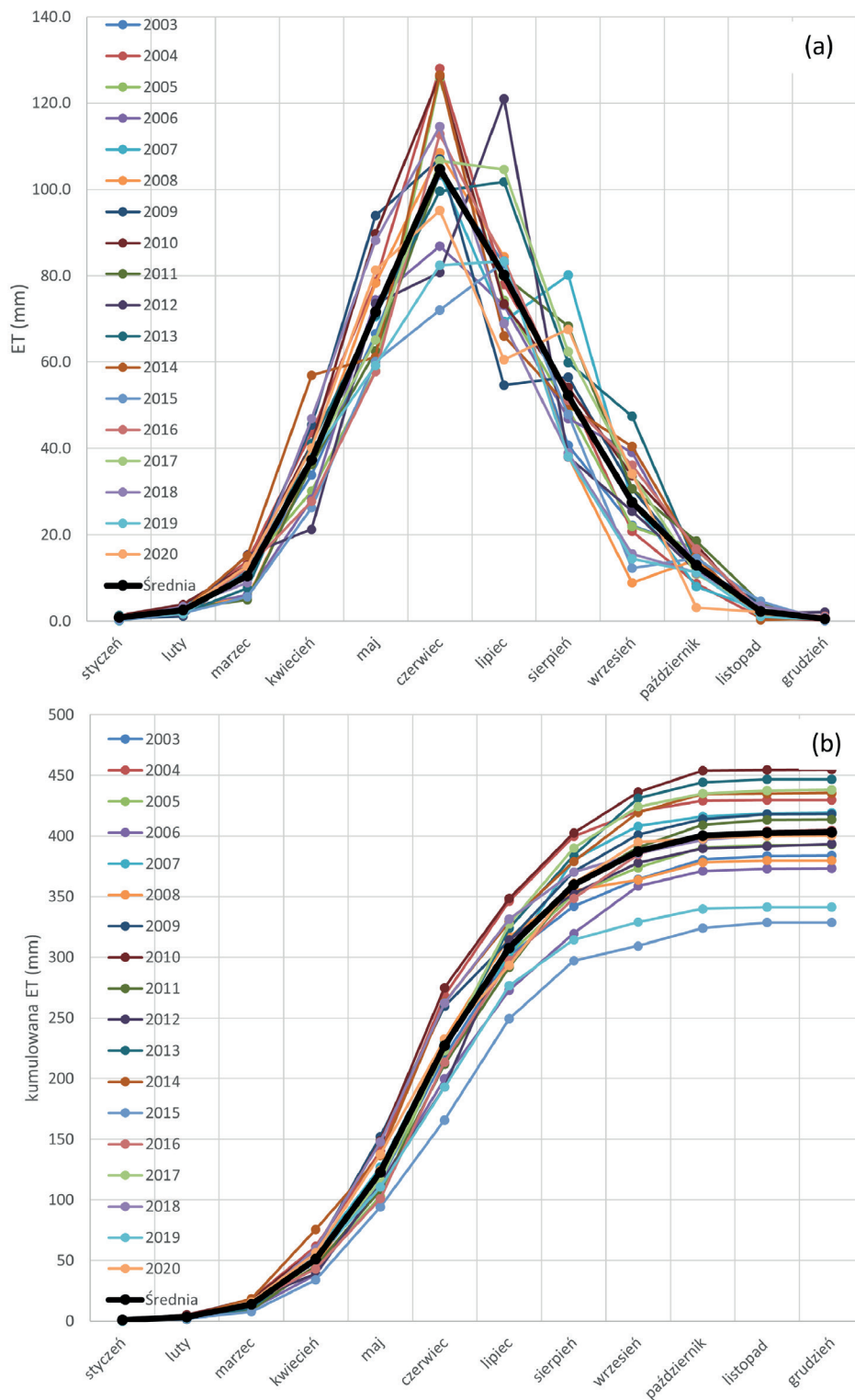


Ryc. 2. Średnie miesięczne sumy ewapotranspiracji (ET) w zlewni rzeki Łasicy w wieloleciu 2003–2020

Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Mean monthly (ET) evapotranspiration in the Łasica River catchment in multi-year period 2003–2020

Source: authors' own elaboration

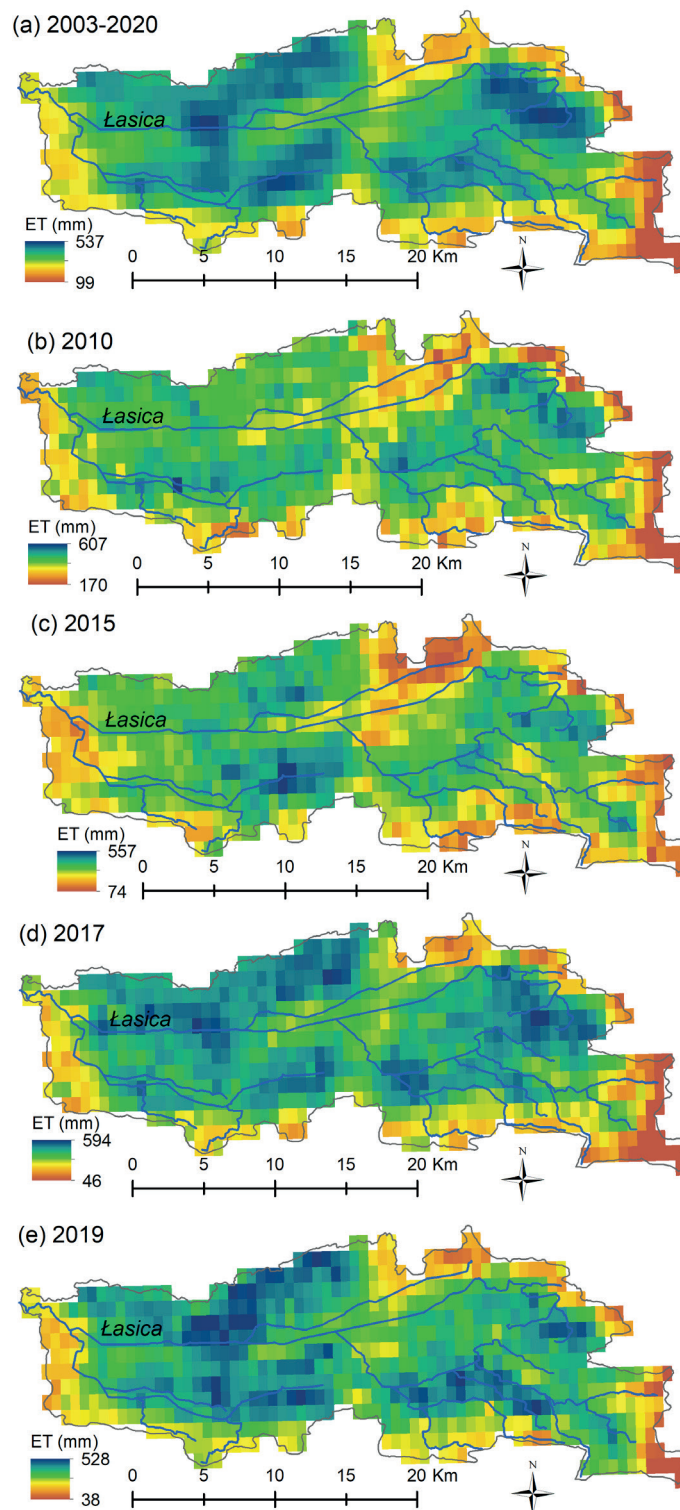


Ryc. 3. Średnie miesięczne (a) i kumulowane (b) sumy ewapotranspiracji (ET) w wieloletniu 2003–2020 w zlewni rzeki Łasicy

Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Mean monthly evapotranspiration (a) and its accumulated sum (b) in the multi-year period 2003–2020 in the Łasica River catchment

Source: authors' own elaboration



Ryc. 4. Przestrzenne zróżnicowanie rocznych sum ewapotranspiracji (ET) w zlewni rzeki Łasicy w latach: (a) 2003–2020, (b) 2010, (c) 2015, (d) 2017 oraz (e) 2019

Źródło: opracowanie własne

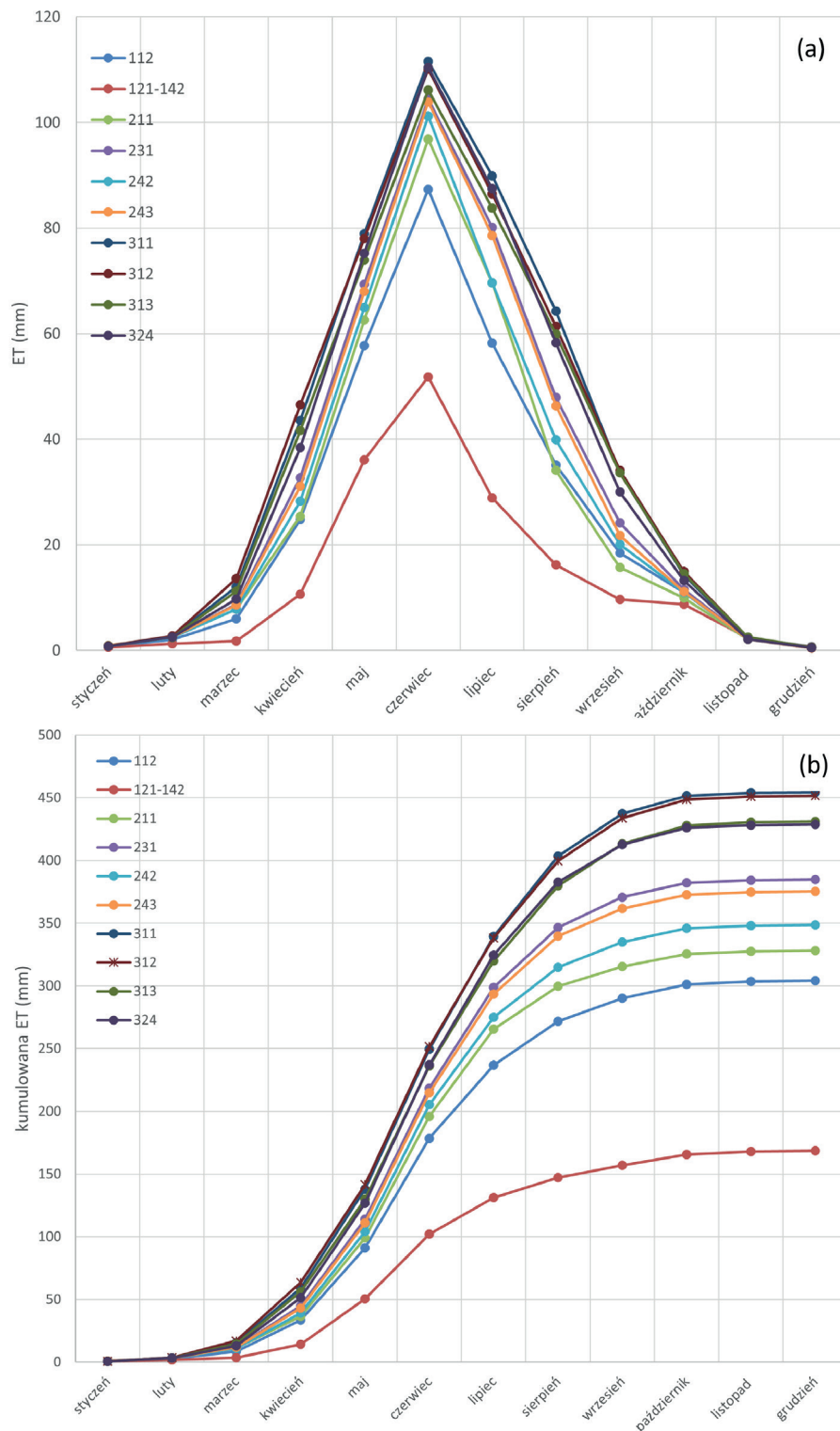
Fig. 4. Spatial patterns of evapotranspiration (ET) in the Łasica River catchment in the years: (a) 2003–2020, (b) 2010, (c) 2015, (d) 2017, and (e) 2019

Source: authors' own elaboration

Zmienność sum miesięcznych ET dla różnych typów pokrycia terenu przedstawiono na rycinie 5. Dla wszystkich analizowanych typów obserwuje się regularny rytm niskich wartości ET w zimie, a następnie stopniowe ich zwiększanie w lecie. Najwyższe miesięczne sumy ET wszystkich typów roślinności są obserwowane w czerwcu. Najwyższe sumy miesięczne dotyczą obszarów leśnych i sięgają 110 mm (Ryc. 5a). W obszarze łąk sumy ET są również stosunkowo wysokie, osiągając 104 mm, natomiast w obszarach pól uprawnych – 97 mm. Najniższe wartości dotyczą obszarów antropogenicznie przekształconych (typy CLC2018 wyróżnione jako 112, 121–142); w czerwcu mieszczą się w zakresie 52–87 mm. Sumy roczne kumulowane, po okresie wysokich przyrostów w lecie, stabilizują się w październiku (Ryc. 5b). Najwyższe sumy roczne (średnie w wieloleciu) dotyczą obszarów leśnych (typy CLC 311, 312, 313 i 324) i mieszczą się w zakresie 430–455 mm (Ryc. 6). Nieco niższe są obserwowane w obszarze łąk (typ CLC 231), gdzie sięgają 385 mm oraz na terenach rolniczych i tych z dużym udziałem roślinności naturalnej (typ CLC 242 i 243), gdzie notuje się wartości od 350 mm do 375 mm. Natomiast najniższe sumy roczne, sięgające 170 mm, notowane są na obszarach silnie przekształconych (typy CLC 121–142), ale lokalnie są dużo niższe. We wszystkich typach użytkowania, maksimum i minimum ET znacznie różni się od wartości średnich (Ryc. 6); powodem może być zbyt niska rozdzielczość danych CLC2018, dla których minimalna powierzchnia mapowania wynosi 25 ha. Może to skutkować niedokładnym wydzieleniem pikseli z obrazów rastrowych ET, charakteryzujących się wyższą rozdzielczością.

W efekcie zmiennego z roku na rok zasilania opadem atmosferycznym, który wpływa na odnawialność i dostępność glebowych zasobów wilgoci, współczynnik WWO waha się od 54% do 61% w latach wilgotnych (lata 2010, 2013 i 2017), oraz od 66% do 77% w latach suchych (lata 2015, 2018 i 2019) (Ryc. 7). Niskie opady atmosferyczne skutkują wysokim zużyciem opadu odnawiającego zasoby wilgoci glebowej, ale w latach tych sumy ET są stosunkowo niskie. Natomiast w latach wilgotnych współczynnik WWO jest niski, lecz sumy ET są wówczas relatywnie wysokie.

Na uwagę zasługują podobne sumy ET dla różnych typów lasów, wydzielonych w tej pracy jako lasy liściaste, iglaste, mieszane lub w stanie transformacji. Warto zaznaczyć, że niektóre prace sygnalizują dużo wyższe wartości ET w lasach iglastych niż te notowane w lasach liściastych (Swank i Douglass 1974). Może to wynikać przede wszystkim ze zmniejszonej transpiracji w lasach liściastych w okresie bezlistnym, w stosunku do lasów iglastych. Natomiast inne prace wykazują brak takich różnic. Przykładowo, z prac Komatsu i in. (2007) wynika, że ET lasów iglastych nie jest wyższe niż lasów liściastych. Zatem można przypuszczać, że różnice lub ich brak są silnie determinowane przez lokalne warunki, wśród których istotne są: mikroklimat, zasoby wilgoci glebowej oraz cechy drzewostanu. W przypadku zlewni rzeki Łasicy, uzyskane wyniki wskazują na brak znaczących różnic, zarówno w przebiegu miesięcznym, jak i rocznym ET. Większe różnice zaznaczały się w wielkości ET szacowanej na podstawie danych pozyskanych z projektu MODIS (Somorowska 2011); w latach 2001–2008 ET w lasach iglastych stanowiła około 75% ET w lasach liściastych. W tym wypadku, przyczyną mogło być zasilanie strefy korzeniowej płytką wodą podziemną w pasach bagiennych, którą wykorzystują występujące tam lasy liściaste. Zatem dalszy kierunek prac powinien objąć porównanie szacunków ET według różnych algorytmów, stosując ten sam okres obserwacji. Szczególnie przydatne do tego celu będą dane ewapotranspiracji aktualnej udostępniane w projekcie MODIS *Global Evapotranspiration*, opracowane według algorytmu wykorzystującego założenia modelu Penmana-Monteitha (Mu i in. 2007).

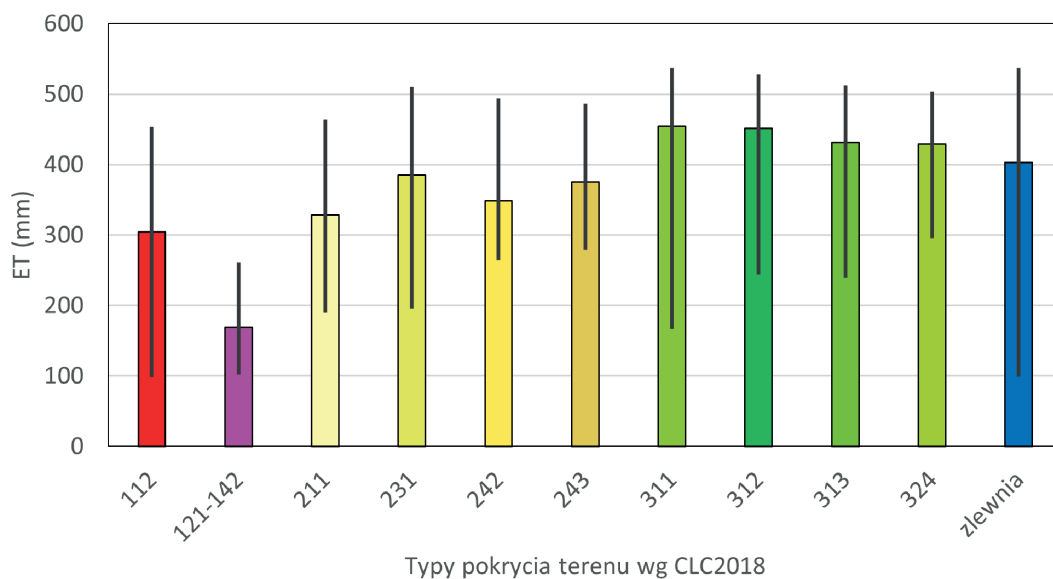


Ryc. 5. Średnie miesięczne (a) i kumulowane (b) sumy ewapotranspiracji (ET) w typach pokrycia terenu wg CLC2018, w wieloletniu 2003–2020 w zlewni rzeki Łasicy

Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Mean monthly evapotranspiration (a) and its accumulated sum (b) in different types of the CLC2018 in the multi-year period 2003–2020 in the Łasica River catchment

Source: authors' own elaboration

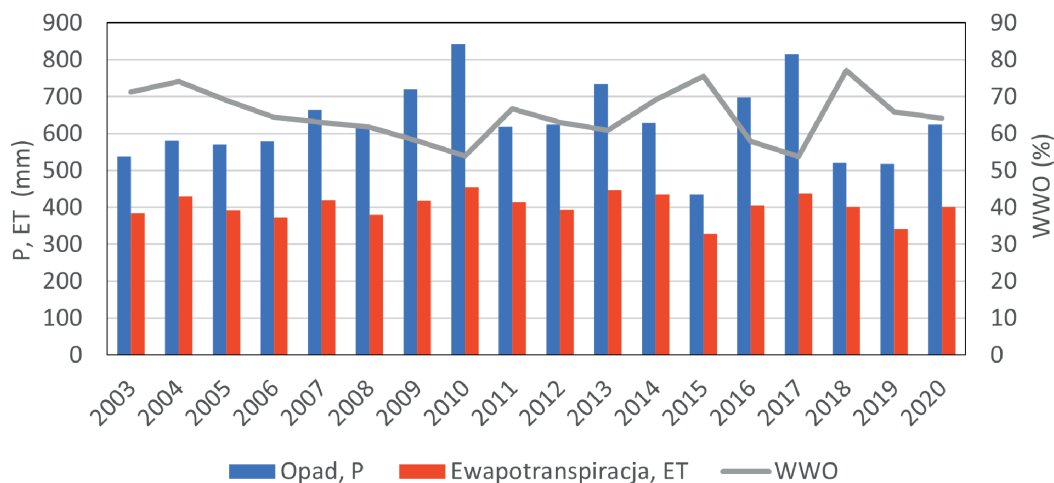


Ryc. 6. Średnie roczne sumy ewapotranspiracji w wieloleciu 2003–2020 w różnych typach pokrycia terenu i w zlewni, wraz z zakresem minimum–maksimum

Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Mean annual evapotranspiration in the multi-year period 2003–2020 in different types of land cover and in the catchment, along with the minimum–maximum range

Source: authors' own elaboration



Ryc. 7. Roczne sumy opadu, ewapotranspiracji i współczynnika wykorzystania opadu (WWO) w wieloleciu 2003–2020

Źródło: opracowanie własne

Fig. 7. Annual precipitation, evapotranspiration and index of precipitation utilization (WWO) in the multi-year period 2003–2020 in the Łasica River catchment

Source: authors' own elaboration

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zmienność czasową oraz zróżnicowanie przestrzenne ewapotranspiracji aktualnej (ET) w zlewni rzeki Łasicy w wieloleciu 2003–2020, wykorzystując dane z projektu SSEBop. Zastosowano współczynnik wykorzystania opadu (WWO) do oceny stopnia zużycia opadu na potrzeby wodne roślin. Najwyższą ewapotranspiracją charakteryzują się obszary leśne, nieco mniejszą pasy bagienne pokryte roślinnością łąkowa, zaś najmniejszą tereny użytkowane rolniczo oraz tereny antropogenicznie przekształcone. Zróżnicowanie przestrzenne zaznacza się szczególnie wyraźnie w okresie wegetacyjnym, od kwietnia do października. Średnia roczna suma ewapotranspiracji wynosi 403 mm, z czego aż 96% przypada na okres wegetacyjny. Najwyższe wartości miesięczne występują w maju (72 mm), czerwcu (105 mm) i lipcu (80 mm). Maksimum ET przypada na czerwiec, a nie na lipiec, jak stwierdzono we wcześniejszej pracy (Somorowska 2011). Ponadto brak jest wyraźnych różnic w wartościach ewapotranspiracji pomiędzy poszczególnymi typami zbiorowisk leśnych. Różnice takie wykazywano w badaniach wykorzystujących dane MODIS (Somorowska 2011). Najniższe roczne sumy ewapotranspiracji wystąpiły w latach 2015 (329 mm), 2019 (342 mm) i 2003 (384 mm), natomiast szczególnie wysokie – w latach 2010 (455 mm) i 2013 (447 mm). Było to efektem zmiennego z roku na rok zasilania zlewni opadem. W latach suchych (2003, 2015 i 2019) współczynnik WWO wyniósł nawet 71–77%, natomiast w latach szczególnie wilgotnych (2010 i 2013), WWO był dużo niższy i wyniósł 54–58%.

Uzyskany obraz zróżnicowania przestrzennego ewapotranspiracji i jego zmian w czasie może być przydatny przy monitoringu uwilgotnienia i stanu Puszczy Kampinoskiej, do śledzenia zmian użytkowania terenu w zlewni, ale również do oceny jakości i zmian środowiskowych na danym obszarze w dobie zmian klimatu. Zasadne jest objęcie dalszymi badaniami tego unikatowego pod względem przyrodniczym obszaru, mającymi na celu wyjaśnienie relacji w wielkości ewapotranspiracji między poszczególnymi typami pokrycia terenu. Celowe wydaje się porównanie ewapotranspiracji według modelu SSEBop z najnowszymi danymi z projektu MODIS. Podsumowując, wykorzystanie przestrzennie rozłożonych długoterminowych danych teledetekcyjnych pozwala uchwycić zmienne w czasie zróżnicowanie przestrzenne ilości wody uczestniczącej w procesie ewapotranspiracji, a tym samym dokładniej niż w punkcie oszacować jej wielkość. Przedmiotem dalszych studiów hydrologicznych powinna być również próba zastosowania opracowanych danych w modelu bilansowym zlewni.

Literatura

- Gutry-Korycka M., Jokieli P., 2017, Bilans i zasoby wodne Polski, [w:] P. Jokieli, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., Warszawa, s. 281–292.
- Hari V., Rakovec O., Markonis Y., Hanel M., Kumar R., 2020, Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports*, 10, 12207. DOI: 10.1038/s41598-020-68872-9
- IMGW-PIB-BMKP, 2019, Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, No.13. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB).
- IMGW-PIB-BPSHM, 2019, Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej Rok 2019, ROK. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB).
- 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 Sensing of the Environment*, 111, s. 519–536, DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.015.
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens, B., Miralles, D., Piles, M., Rodríguez-Fernández N., Zsoter E., Buontempo, C., Thépaut, J.-N., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth System Science Data*, 13(9), s. 4349-4383, DOI:10.5194/essd-13-4349-2021.
- Peel M.C., McMahon T.A., Finlayson B.L., 2010, Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale. *Water Resources Research*, 46, s. 1–16, DOI:10.1029/2009WR008233.

- Piniewski M., Szcześniak M., Kardel I., Chattopadhyay S., Berezowski T., 2021, G2DC-PL+: A gridded 2 km daily climate dataset for the union of the Polish territory and the Vistula and Odra basins, *Earth System Science Data*, 13, s. 1273–1288, DOI:10.5194/essd-13-1273–2021.
- Rodell M., Beaudoin H. K., L'Ecuyer T. S., Olson W. S., Famiglietti J. S., Houser P. R., Adler R., Bosilovich M. G., Clayson C. A., Chambers D., Clark E., Fetzer E. J., Gao X., Gu G., Hilburn K., Huffman G. J., Lettenmaier D. P., Liu W. T., Robertson F. R., Schlosser C. A., Sheffield J., Wood E. F., 2015, The Observed State of the Water Cycle in the Early Twenty-First Century, *Journal of Climate*, 28(21), s. 8289–8318, DOI:10.1175/JCLI-D-14-00555.1.
- Seibert J., Vis M., 2012, Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, s. 3315–3325, DOI: 10.5194/hess-16-3315-2012.
- Senay G.B., Bohms S., Singh R.K., Gowda P.H., Velpuri N.M., Alemu H., Verdin J.P., 2013, Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach, *Journal of the American Water Resources Association*, 49, s. 577–591, DOI:10.1111/jawr.12057.
- Senay G.B., Kagone S., Velpuri N.M., 2020, Operational global actual evapotranspiration: Development, evaluation, and dissemination, *Sensors (Switzerland)* 20, s. 1–18, DOI: 10.3390/s20071915.
- Soczyńska U., Gutry-Korycka M., Pokojska P., Mikos D., 2003, Water balance as base for proper water management in the Łasica catchment (Kampinos National Park), *Ecohydrology and hydrobiology*, 3, s. 291–309.
- Somorowska U., 2011, Variable patterns of evapotranspiration in a protected wetland catchment derived from MODIS data, [w:] J.M. Sawicki, W. Szpakowski (red.), *Ecohydrological methods in water management*, Gdańsk University of Technology Publishers, Gdańsk, s. 120–130.
- Somorowska U., Gutry-Korycka M., Lenartowicz M., Chormański J., Szporak S., 2011, Charakterystyka uwarunkowań hydrologicznych. [w:] T. Okruszko, W. Mioduszewski, L. Kucharski (red.), *Ochrona i renaturyzacja mokradeł Kampinoskiego Parku Narodowego*, s. 45 – 71, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Swank W.T., Douglass J.E., 1974, Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine, *Science*, 185, s. 857–859.
- Zhao L., Xia J., Xu C., Wang Z., Sobkowiak L., Long C., 2013, Evapotranspiration estimation methods in hydrological models, *Journal of Geographical Sciences*, 23(2), s. 359–369.