

SZACOWANIE EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ ZAKRZACZEŃ BRZozOWYCH NA TORFOWISKU NISKIM NA PODSTAWIE DOBOWYCH ZMIAN STANÓW WÓD PODZIEMNYCH

**Mateusz GRYGORUK^{1, 2)}, Dorota MIROSLAW-ŚWIĄTEK¹⁾,
Tomasz OKRUSZKO¹⁾, Okke BATELAAN³⁾, Jan SZATYŁOWICZ⁴⁾**

¹⁾ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Inżynierii Wodnej

²⁾ Biebrzański Park Narodowy, Osowiec-Twierdza

³⁾ Vrije Universiteit Brussel, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering

⁴⁾ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Kształtowania Środowiska

Słowa kluczowe: Biebrza, ewapotranspiracja, mokradła, torfowisko, wody podziemne

Streszczenie

W pracy oszacowano ewapotranspirację rzeczywistą zakrzaczeń brzozowych na torfowisku niskim, na podstawie dobowej dynamiki stanów wód podziemnych mierzonych co godzinę, w trzech wybranych okresach bezopadowych (17–21.08.2008, 1–7.09.2008, 5–9.08.2009). Wyniki obliczeń zweryfikowano na podstawie ewapotranspiracji rzeczywistej, obliczonej metodą ewapotranspiracji wskaźnikowej skorygowanej za pomocą współczynników roślinnych. Ewapotranspiracja rzeczywista zakrzaczeń brzozowych wynosiła od 19,2 (1–7.09.2008) do 25,1 mm (5–9.08.2009). W okresach 17–21.08.2008 i 5–9.08.2009 wykazano dobrą zgodność wyników otrzymanych obydwoma metodami, odpowiednio 11 i 19% różnicy, natomiast w okresie 1–7.09.2008 różnica między obliczonymi wartościami wynosiła 27%. Wartości współczynników roślinno-glebowo-wodnych zakrzaczeń brzozowych, obliczone jako stosunek ewapotranspiracji rzeczywistej wyznaczonej metodą analizy hydrogramu wód podziemnych i ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej metodą Penmana-Monteitha, wynosiły 1,59 w okresie 17–21.08.2008 w warunkach średniej głębokości położenia zwierciadła wód podziemnych wynoszącej 0,35 m; 1,31 w okresie 1–7.09.2008 w warunkach średniej głębokości położenia zwierciadła wód podziemnych wynoszącej 0,45 m oraz 1,49 w okresie 5–9.08.2009 w warunkach średniej głębokości położenia zwierciadła wód podziemnych wynoszącej 0,1 m. Dostrzeżono

Adres do korespondencji: mgr M. Grygoruk, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; tel. +48 (22) 593-53-23, e-mail: M.Grygoruk@levis.sggw.pl

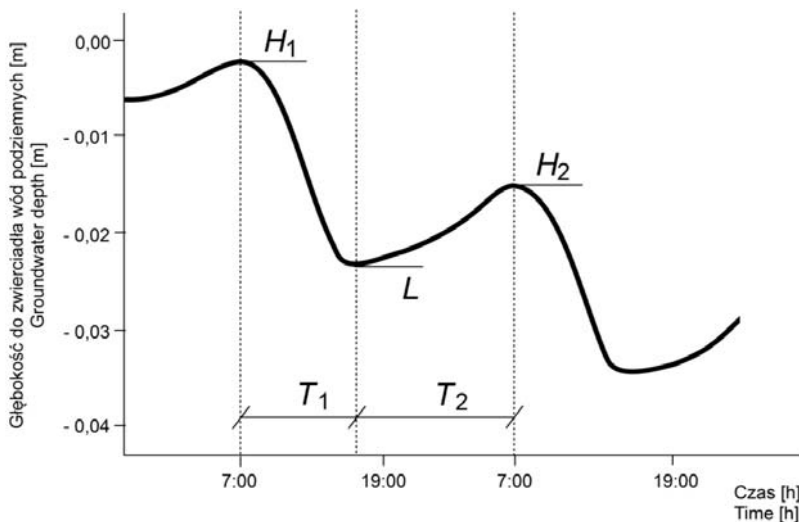
możliwość zastosowania przedstawionej metody do weryfikacji i uszczegółowienia dotychczas stosowanych współczynników roślinno-glebowo-wodnych różnych typów roślinności bagiennej w okresach hydrologicznego niedoboru wody w profilu glebowym i niskich stanów wód podziemnych w okresach bezopadowych. Metoda może również być zastosowana do kalibracji modeli hydrologicznych opisujących relacje między dynamiką płytkich wód podziemnych a ewapotranspiracją w warunkach zróżnicowanej szaty roślinnej.

WSTĘP

Ewapotranspiracja jest jedną z najistotniejszych składowych bilansu wodnego torfowisk niskich [MIODUSZEWSKI i in. 1996]. Intensywność ewapotranspiracji w ekosystemach bagiennych zależy od aktualnych warunków meteorologicznych, sytuacji hydrologicznej (zawartości wody w glebie) w danym siedlisku, jak również od typu szaty roślinnej i stopnia jej rozwoju, od którego zależy potencjał ewapotranspiracyjny danego gatunku roślin lub kompleksowo ujmowanego zbiorowiska roślinnego [BRANDYK i in. 1996; ŁABĘDZKI i in. 1996]. W klasycznych algorytmach szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej, warunki meteorologiczne są reprezentowane przez wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej, wyznaczonej m.in. metodą Penmana-Monteitha [ALLEN i in. 1998], a oddziaływanie szaty roślinnej na proces parowania jest najczęściej przybliżane za pomocą empirycznie wyznaczonych współczynników roślinnych [np. SZUNIEWICZ, CHRZANOWSKI 1996]. Równie istotnym czynnikiem wpływającym na intensywność procesu ewapotranspiracji jest zawartość wody w glebie, która w krytycznych przypadkach suszy glebowej może prowadzić do stresu hydrologicznego i ograniczenia ewapotranspiracji, pomimo sprzyjających parowaniu warunków meteorologicznych [OLSZTA i in. 1990; ROGUSKI i in. 1990]. Zaproponowano zatem, by do szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie ewapotranspiracji wskaźnikowej stosować – prócz współczynników roślinnych – współczynniki glebowo-wodne [SZAJDA 1997] lub kompleksowe i zintegrowane współczynniki roślinno-glebowe [KACA, KASPERSKA 2000].

W badaniach nad ewapotranspiracją rzeczywistą wybranych obszarów mokradłowych stwierdzono, że dobowa zmienność poboru wody przez rośliny, w wyniku zmiennej w ciągu doby intensywności fotosyntezy roślinności bagiennej, dla której głównym źródłem wody są zasoby najpłytszego horyzontu wodonośnego, powoduje występowanie dobowego cyklu zmian położenia zwierciadła wód podziemnych [WHITE 1932] (rys. 1). Wykazano również, że na podstawie analizy zmienności położenia zwierciadła wód podziemnych można w wybranych okresach bezopadowych precyzyjnie szacować ewapotranspirację rzeczywistą [LOCHEIDE i in. 2005; NACHABE i in. 2005; NICHOLS 1993]. Podstawą szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej w metodzie zaprezentowanej przez WHITE'a [1932] i zmodyfikowanej przez HAYSA [2003], jest wysokorozdzielczy hydrogram stanów wód podziemnych, na którym uwidacznia się dobowy cykl pulsacji zwierciadła wody

w strefie korzeniowej roślin (rys. 1). Zmiany położenia zwierciadła wody pod wpływem ewapotranspiracji są najwyraźniejsze w dłuższych, kilku- lub kilkunastodniowych okresach bezopadowych, gdy zasoby najpłytszych wód podziemnych nie są zasilane w wyniku infiltracji opadu.



Rys. 1. Schematyczny hydrogram stanów wód podziemnych obrazujący dobową zmienność położenia zwierciadła wody, powodowaną dobową zmiennością intensywności ewapotranspiracji (za HAYS [2003], MOULD i in. [2010] oraz WHITE [1932]); H_1 – najwyższy stan wód podziemnych w danym dniu; L – najniższy stan wód podziemnych w danym dniu; H_2 – najwyższy stan wód podziemnych w dniu kolejnym; T_1 – czas, w którym następuje obniżenie zwierciadła wód podziemnych od stanu H_1 do L ; T_2 – czas, w którym następuje wzrost położenia zwierciadła wód podziemnych od stanu L do H_2

Fig. 1. Schematic groundwater hydrograph presenting diurnal dynamics of groundwater level induced by diurnal dynamics of evapotranspiration (after HAYS [2003], MOULD *et al.* [2010] and WHITE [1932]); H_1 – the highest groundwater level recorded on a given day; L – the lowest groundwater level recorded on a given day; H_2 – the highest groundwater level recorded the next day; T_1 – the time the groundwater level declines from H_1 to L ; T_2 – the time the groundwater level rises from L to H_2

W wybranych siedliskach torfowiskowych, cykl zmienności położenia zwierciadła wód podziemnych w okresach bezopadowych (rys. 1.) rozpoczyna się o świcie, wraz z rozpoczęciem procesów fotosyntezy. Stan wód podziemnych jest wtedy najwyższy H_1 . Wzrost intensywności ewapotranspiracji do wczesnych godzin popołudniowych powoduje postępujące wyczerpywanie wód najpłytszego horyzontu wodonośnego, większe niż dopływ podziemny, w wyniku czego następuje obniżenie zwierciadła wód podziemnych, aż do najniższego stanu zanotowanego w ciągu danej doby L . Od późnego popołudnia do zmierzchu, zwierciadło wód podziemnych stopniowo wznosi się w wyniku zasilania podziemnego (dopływ lateralny), które bilansuje zmniejszającą się ewapotranspirację. Po zmierzchu, gdy ewapotran-

spiracja maleje niemal do zera, zwierciadło wody podnosi się w wyniku zasilania lateralnego, aż do rozpoczęcia kolejnego dobowego cyklu fotosyntezy H_2 , w którym ponownie wzrasta intensywność ewapotranspiracji, a zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych wchodzą w kolejny cykl dobowy.

Celem niniejszej pracy było oszacowanie ewapotranspiracji rzeczywistej zakrzaceń brzozowych na użytkowanym torfowisku niskim, na podstawie zmian położenia zwierciadła wód podziemnych w ciągu doby. Otrzymane wyniki porównano z ewapotranspiracją wskaźnikową obliczoną klasyczną, rekomendowaną przez FAO metodą Penmana-Monteitha [ALLEN i in. 1998], skorygowaną za pomocą współczynników roślinnych. Na podstawie analizy zależności między cyklicznymi zmianami położenia zwierciadła płytkich wód podziemnych a ewapotranspiracją w okresach bezopadowych wyznaczono przykładowe wartości współczynników roślinno-glebowo-wodnych zakrzaceń brzozowych w analizowanych okresach.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

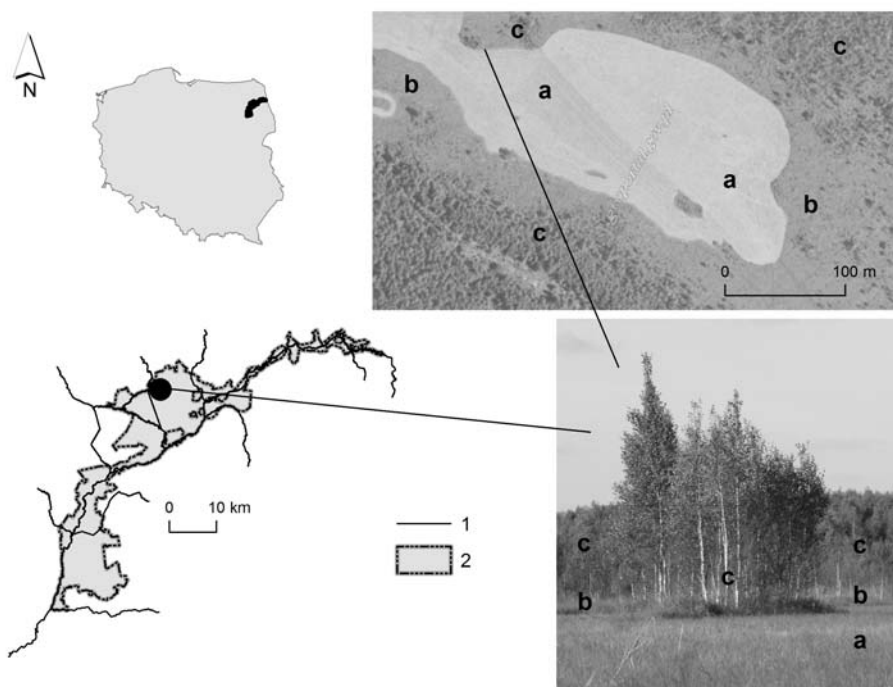
Eksperyment oceny ewapotranspiracji rzeczywistej zakrzaceń brzozowych przeprowadzono na użytkowanej łące, na torfowisku niskim, w Środkowym Basenie Biebrzy, w okolicach obszaru ochrony ścisłej Biebrzańskiego Parku Narodowego „Czerwone Bagno” (rys. 2).

Mozaikowy krajobraz obszaru badań składa się z turzycowisk i łąk trzęślicowych (z gatunkami dominującymi turzycą Buxbauma (*Carex buxbaumii* Wahlenb.), turzycą prosowatą (*Carex panicea* L.) i trzęślicą modrą (*Molinia caerulea* (L.) Moench), zarówno ekstensywnie użytkowanych, jak i niekoszonych, na których następuje postępująca ekspansja zakrzaceń brzozy omszonej (*Betula pubescens* Ehrh.) oraz olchy (*Alnus* sp.) i wierzby (*Salix* sp.).

W obliczeniach zastosowano algorytm wyznaczania dobowej ewapotranspiracji rzeczywistej ($\text{mm} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$) na podstawie analizy wysokorozdzielczego czasowo hydrogramu stanów wód podziemnych (ET_{GW}), przedstawiony po raz pierwszy przez WHITE'a [1932] (równanie 1), a następnie zmodyfikowany przez HAYSA [2003] (równanie 2) i zweryfikowany przez MOULDA i in. [2010], jako miarodajny do szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na obszarach mokradłowych:

$$ET_{GW} = 1000S_y \left[\frac{H_2 - L}{T_2} \pm (H_1 - H_2) \right] \quad (1)$$

$$ET_{GW} = \left[(H_1 - L) + \frac{H_2 - L}{T_1} T_2 \right] 1000S_y \quad (2)$$



Rys. 2. Lokalizacja terenu badań; 1 – cieki, 2 – obszar Biebrzańskiego Parku Narodowego; a – łąka koszona, b – łąka niekoszona, c – zakrzaczenia brzoźowe (ortofotomapa: www.geoportal.gov.pl)

Fig. 2. Study area; 1 – rivers, 2 – the area of the Biebrza National Park; a – mown meadow, b – not mown meadow, c – birch thickets (aerial photograph: www.geoportal.gov.pl)

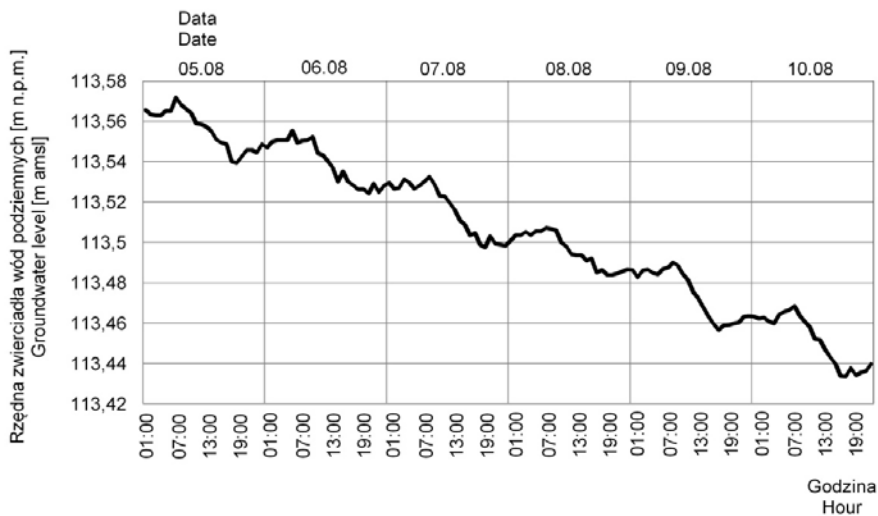
gdzie:

- H_1 – najwyższy stan wód podziemnych zanotowany w danym dniu, m;
- H_2 – najwyższy stan wód podziemnych zanotowany w dniu kolejnym, m;
- L – najniższy stan wód podziemnych zanotowany w danym dniu, m;
- T_1 – czas, w którym nastąpiło obniżenie zwierciadła wód podziemnych od stanu najwyższego do najniższego w danym dniu, h;
- T_2 – czas, w którym nastąpił wzrost stanu wód podziemnych od najniższego w danym dniu do najwyższego w dniu kolejnym, h;
- S_y – współczynnik odciekalności warstwy gleby, w której następują zmiany położenia zwierciadła wody w danym dniu.

W oryginalnym algorytmie WHITE'a [1932] (równanie 1) nie założono bezpośrednio, że uzupełnianie strat wody w profilu glebowym, powstających w wyniku ewapotranspiracji, zachodzi przez całą dobę. W równaniu pojawia się tylko parametr T_2 , opisujący upływ czasu od chwili wystąpienia najniższego stanu wody L do chwili uzupełnienia zasobów wody w glebie w wyniku dopływu podziemnego, na początku kolejnego cyklu dobowego H_2 (rys. 1). W modyfikacji algorytmu WHI-

TE'a [1932] dokonanej przez HAYSA [2003], odniesienie intensywności dopływu lateralnego ($H_2 - L$) do czasu T_1 oraz T_2 wprowadza założenie, że dopływ lateralny do profilu glebowego następuje zarówno w pierwszym okresie cyklu dobowego (między H_1 i L), gdy zwierciadło wody ulega obniżeniu a ewapotranspiracja jest większa niż dopływ podziemny, jak również w drugim okresie cyklu dobowego (między L i H_2), gdy obserwuje się podwyższenie zwierciadła wody, a dopływ podziemny jest większy niż ewapotranspiracja.

Stany wód podziemnych, na podstawie których oszacowano ewapotranspirację rzeczywistą, mierzono w zasięgu zakrzaczeń brzożowych otoczonych koszoną łąką, w płytkim piezometrze wykonanym z rury PCV o średnicy 40 mm, stabilnie osadzonej w piasku podścielającym warstwę torfów, w celu wykluczenia możliwości pionowych ruchów pulsacyjnych piezometru w warunkach zmiennego uwilgotnienia torfów. Pomiary stanów wód podziemnych były wykonywane automatycznie, za pomocą czujnika typu Diver®, co 1 godzinę (dokładność pomiaru do ok. 0,001 m). Przykładowy hydrogram stanów wód podziemnych, stanowiący podstawę obliczania ewapotranspiracji rzeczywistej, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Hydrogram stanów wód podziemnych w okresie 5–10.08.2009; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Groundwater level hydrograph in the period 5–10.08.2009; source: own studies

Ze względu na możliwość zastosowania przyjętej metody szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej wyłącznie w okresach bezopadowych [HAYS 2003; LOHEIDE i in. 2005; MOULD i in. 2010], obliczenia wykonano dla okresów 17–21.08.2008, 1–7.09.2008 oraz 5–9.08.2009, kiedy na badanym obszarze nie wystąpił opad. W tabeli 1. przedstawiono zakres zmienności stanów wód podziemnych w każdym z okresów, dla których przeprowadzono obliczenia.

Rzędną terenu torfowiska określano regularnie, co ok. 14–21 dni, na podstawie pomiaru odległości od wierzchołka piezometru do stałego punktu na powierzchni torfowiska. Na podstawie pomiarów niwelacyjnych stwierdzono, że rzędna wierzchołka piezometru nie ulega zmianom. Typ gleby w siedlisku, w którym przeprowadzono badania, określono jako Mtl(a)bb [RYCHARSKI i in., 2010]. Wartości współczynnika odciekalności torfów S_y , odzwierciedlającej ilość wody, jaka grawitacyjnie odpływa z jednostkowej objętości gleby, wykorzystane do obliczenia ewapotranspiracji rzeczywistej (2), określono na podstawie badań CHURSKIEGO i SZUNIEWICZA [1991] oraz SZUNIEWICZA [1994]. Z badań nad współczynnikiem odciekalności torfów wynika, że jego wartości są dla danego typu gleby często niejednorodne i znacząco się od siebie różnią [BRANDYK, SZATYŁOWICZ 2002; CHRZANOWSKI 2002; CHURSKI, SZUNIEWICZ 1991; LETTS i in., 2000; MIODUSZEWSKI i in. 1996; MOULD i in. 2010; SZUNIEWICZ 1994].

Tabela 1. Rzędne zwierciadła wody na początku i na końcu każdego z trzech analizowanych okresów oraz obniżenie zwierciadła wody

Table 1. Groundwater elevations in the beginning and at the end of each of three analyzed periods and the groundwater level decline

Okres obliczeniowy Calculation period	Rzędna terenu m n.p.m. Ground altitude m a.s.l.	Rzędne zwierciadła wody, m n.p.m. Groundwater altitude, m a.s.l.		Obniżenie zwierciadła dła wody, m Groundwater level drawdown, m
		max.	min.	
17–21.08.2008		113,32	113,21	0,11
01–07.09.2008	113,61	113,19	113,10	0,09
05–09.08.2009		113,56	113,48	0,08

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

Zaobserwowano również, szczególnie w okresach letnich, negatywny wpływ oddziaływania lasu na właściwości retencyjne gleb organicznych torfowych i murszowo-torfowych, w wyniku zwiększonej intensywności ewapotranspiracji w okresach bezopadowych [CHRZANOWSKI 2002]. Podobną niejednorodność oceny można dostrzec w interpretacji pionowej zmienności S_y w profilu gleb torfowych [MOULD i in. 2010; LETTS i in. 2000]. Wobec braku precyzyjnego rozpoznania współczynnika S_y torfów w badanym siedlisku przyjęto, że wynosi on 0,18 i – wobec niewielkiego zakresu zmienności stanów wód podziemnych w analizowanych okresach (tab. 1) – jest jednorodny we wszystkich warstwach profilu glebowego.

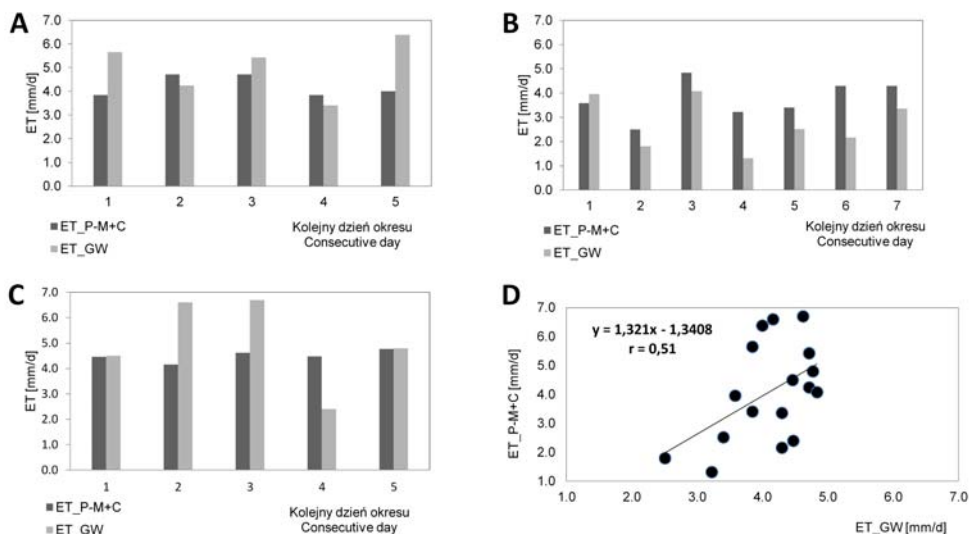
Dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej obliczone na podstawie analizy dobowych zmian położenia zwierciadła wód podziemnych porównano – w celu weryfikacji – z dobowymi wartościami ewapotranspiracji rzeczywistej obliczonymi metodą Penmana-Monteitha [ALLEN i in. 1998] z zastosowaniem współczynników roślinnych. Ze względu na powszechne zastosowanie w literaturze światowej metody proponowanej przez ALLENA i in. [1998] do szacowania ewapotranspiracji,

uznano ją za miarodajną i przydatną do weryfikacji otrzymanych wyników. Obliczenia przeprowadzono na podstawie danych meteorologicznych ze stacji Biebrza-Pieńczyków, oddalonej o około 8 km od miejsca, w którym prowadzono przedstawiony w niniejszej pracy monitoring stanów wód podziemnych. Ze względu na trudności w wyznaczaniu empirycznych współczynników roślinnych i konieczność ich obliczania w kontekście poszczególnych regionów i danych warunków terenowych [ALLEN i in. 1998], posłużono się dostępnymi danymi podanymi przez SZUNIEWICZA i CHRZANOWSKIEGO [1996] dla łąki trójkośnej w warunkach utrzymywania się wysokich stanów wód podziemnych. Współczynniki roślinne wyznaczone przez SZUNIEWICZA i CHRZANOWSKIEGO [1996] w celu korygowania ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej metodą Penmana w modyfikacji francuskiej, w warunkach zbliżonych do warunków, w jakich prowadzono prezentowany eksperyment, przytoczono w niniejszym opracowaniu w celach porównawczych, uznając za pewne przybliżenie.

WYNIKI

Dynamika procesu parowania oraz przebieg dobowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej obliczonych obydwojema algorytmami w analizowanych okresach są zbliżone (rys. 4). Współczynnik korelacji wartości dobowych otrzymanych w wyniku obliczeń obydwojema opisanymi metodami wynosi 0,51 (rys. 4d). Mała wartość współczynnika korelacji wynika z różnego charakteru porównywanych metod. Bezpośredni charakter metody szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie dobowych zmian położenia zwierciadła wód podziemnych (ET_GW) wynika z założeń tej metody, integrujących sprzężone zwrotnie oddziaływanie roślinności bagiennej na położenie zwierciadła wody. Oddziaływanie roślinności zależy zarówno od dostępności wody w warstwie korzeniowej, jak również od warunków meteorologicznych. Pośredni charakter metody szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie ewapotranspiracji wskaźnikowej korygowanej za pomocą wyznaczonych empirycznie, okresowych współczynników roślinnych (ET_P-M+C) wynika z faktu, iż nie uwzględnia ona bezpośrednio dostępności wody. Dla obszarów bagiennych metoda ta była stosowana wyłącznie z założeniem dobrej dostępności do wody w strefie korzeniowej, przez co jej zastosowanie w okresach bezopadowych może być ograniczone. Należy zauważyć, że sumaryczne wartości ewapotranspiracji rzeczywistej obliczonej obydwojema metodami są do siebie względnie zbliżone. Różnice między nimi wynoszą 11, 19 i 27% odpowiednio w okresach 17–21.08.2008, 5–9.08.2009 i 1–7.09.2008 (tab. 2).

Na podstawie prezentowanych badań określono średnie wartości współczynników roślinno-glebowo-wodnych K_{ET_GW} zakrzaczeń brzoźowych w analizowanych okresach, obliczone jako stosunek ewapotranspiracji rzeczywistej określonej metodą ET_GW do ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej metodą Penmana-Monteitha (ET_P-M) (tab. 3). Stwierdzono, że współczynnik roślinny K zapropro-



Rys. 4. Dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej; ET_{P-M+C} – ewapotranspiracja obliczona metodą Penmana-Monteitha ze współczynnikami roślinnymi; ET_{GW} – ewapotranspiracja obliczona na podstawie analizy dobowych zmian położenia zwierciadła wód podziemnych; A – okres 5–9.08.2009, B – okres 1–7.09.2008, C – okres 17–21.08.2008, D – porównanie wyników dla wszystkich analizowanych dni; źródło: wyniki własne

Fig. 4. Calculated daily values of actual evapotranspiration; ET_{P-M+C} – evapotranspiration calculated with the Penman-Monteith algorithm with vegetation coefficients; ET_{GW} – evapotranspiration calculated from diurnal fluctuations of groundwater level; A – period 17–21.08.2008, B – period 1–7.09.2008, C – period 5–9.08.2009, D – comparison of results calculated for all days; source: own studies

Tabela 2. Porównanie wartości ewapotranspiracji rzeczywistej zakrzaczeń brzozowych obliczonych metodą Penmana-Monteitha ze współczynnikami roślinnymi (ET_{P-M+C}) oraz metodą analizy dobowych zmian położenia zwierciadła wód podziemnych (ET_{GW})

Table 2. Comparison of actual evapotranspiration values of birch thickets calculated with the Penman-Monteith method with vegetation coefficients (ET_{P-M+C}) and from the analysis of diurnal groundwater level dynamics (ET_{GW})

Okres obliczeniowy Calculation period	ΣET_{P-M+C} mm	ΣET_{GW} mm	$\frac{(\Sigma ET_{P-M+C}) - (\Sigma ET_{GW})}{\Sigma ET_{P-M+C}}$ %	Max. różnica obliczonych wartości dobowych Max. discrepancy between calculated daily values mm·24 h ⁻¹
17–21.08.2008	22,1	25,1	-19	2,4
01–07.09.2008	22,5	25,0	10	2,4
05–09.08.2009	26,3	19,2	27	2,1

Objaśnienia, jak pod rys. 4. Explanations as in fig. 4.

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

nowany przez SZUNIEWICZA i CHRZANOWSKIEGO [1996] dla pierwszej i drugiej dekady sierpnia jest mniejszy niż współczynnik roślinno-glebowo-wodny K_{ET_GW} . Współczynnik K zakrzaczeń brzożowych dla pierwszej dekady września jest natomiast znacznie większy niż współczynnik K_{ET_GW} (tab. 3).

Tabela 3. Współczynniki do obliczania ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej metodą Penmana-Monteitha (ET_{P-M}) dla zakrzaczeń brzożowych na torfowisku niskim

Table 3. Coefficients for the estimation of actual evapotranspiration based on reference evapotranspiration calculated with the Penman-Monteith algorithm (ET_{P-M}) for birch thickets on a fen

Data Date	ET_{P-M} mm	ET_{GW}/ET_{P-M} mm	Średnia głębokość do wody Mean depth to groundwater level m	K_{ET_GW}	K
05.08.2009	3,1	1,8			
06.08.2009	3,8	1,1			
07.08.2009	3,8	1,4	0,1	1,49	1,24
08.08.2009	3,1	1,1			
09.08.2009	3,2	2,0			
17.08.2008	3,1	1,4			
18.08.2008	2,9	2,3			
19.08.2008	3,3	2,1	0,4	1,59	1,42
20.08.2008	3,1	0,8			
21.08.2008	3,4	1,4			
01.09.2008	2,0	2,0			
02.09.2008	1,4	1,3			
03.09.2008	2,7	1,5			
04.09.2008	1,8	0,7	0,5	1,31	1,79
05.09.2008	1,9	1,3			
06.09.2008	2,4	0,9			
07.09.2008	2,4	1,4			

Objaśnienia: K_{ET_GW} – współczynnik roślinno-glebowo-wodny, wyrażony jako stosunek ewapotranspiracji rzeczywistej obliczonej metodą ET_{GW} oraz ET_{P-M} ; K – współczynnik roślinny zaproponowany przez SZUNIEWICZA i CHRZANOWSKIEGO [1996].

Explanations: K_{ET_GW} – plant-soil-water coefficient expressed as a ratio of actual evapotranspiration calculated with the ET_{GW} and the ET_{P-M} ; K – crop coefficient proposed by SZUNIEWICZ and CHRZANOWSKI [1996].

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

DYSKUSJA

Zaprezentowana, nieskomplikowana metoda szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej obszarów mokradłowych w okresach bezopadowych na podstawie analizy hydrogramu stanów wód podziemnych umożliwi precyzyjną kwantyfikację

cję procesów parowania z uwzględnieniem jednego z najistotniejszych dla tego procesu czynników – aktualnej dostępności wody w siedlisku. Klasyczne metody, np. przytoczone w niniejszej pracy szacowanie ewapotranspiracji wskaźnikowej metodą Penmana-Monteitha na podstawie danych meteorologicznych [ALLEN i in. 1998] oraz korekta wyników z zastosowaniem określonych empirycznie współczynników roślinnych [SZUNIEWICZ, CHRZANOWSKI 1996], nie uwzględniają bezpośrednio aktualnej sytuacji hydrologicznej w siedlisku oraz dostępności wody w strefie korzeniowej. Może to – szczególnie w letnich okresach bezopadowych – prowadzić do błędnego oszacowania ewapotranspiracji rzeczywistej, ponieważ zasoby wody dostępne dla roślin są w tych okresach ograniczone, przez co ewapotranspiracja może zachodzić z dużo mniejszą intensywnością niż wynikałoby to ze sprzyjających procesowi parowania warunków meteorologicznych, na podstawie których jest obliczana ewapotranspiracja wskaźnikowa. Problem ten został dostrzeżony w badaniach ROGUSKIEGO i in. [1990], SZAJDY [1997] oraz OLSZTY i in. [1990], w których zaproponowano stosowanie kompleksowych współczynników glebowo-wodnych. Algorytm ich wyznaczania jest jednak dużo bardziej skomplikowany (np. KACA, KASPERSKA [2000]) niż metoda ET_GW. Chcąc wyznaczyć tą metodą współczynniki roślinno-glebowo-wodne do obliczania ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie ewapotranspiracji wskaźnikowej Penmana-Monteitha, wystarczy prowadzić w wybranych typach siedlisk wysokorozdzielczy czasowo monitoring wód podziemnych. Warunkiem powodzenia jest stosowanie automatycznego sprzętu pomiarowego zdolnego do rejestracji położenia zwierciadła wody z dokładnością do dziesiątych części milimetra. Wyznaczenie zależności regresyjnej między mierzoną głębokością położenia zwierciadła wody a współczynnikami roślinno-glebowo-wodnymi obliczonymi jako stosunek ET_{GW} i ET_{P-M} umożliwi ekstrapolację wartości współczynników nawet poza okresy, dla których prowadzono obliczenia.

Inną istotną zaletą metody szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej ET_{GW} jest wykorzystanie sprzężenia zwrotnego między ewapotranspiracją a położeniem zwierciadła wód podziemnych. Dzięki temu, metoda ta może być stosowana do precyzyjnej kalibracji modeli matematycznych, opisujących położenie i przepływ wód podziemnych, m.in. w funkcji zróżnicowanego zapotrzebowania na wodę różnych zbiorowisk roślinności bagiennej oraz kompozycji krajobrazu obszarów łąk bagiennych użytkowanych rolniczo [GRYGORUK i in. 2011a, 2011b]. Modele te mogą być następnie stosowane do ilościowego opisu pionowego strumienia wymiany wody w siedliskach w wyniku zasilania opadowego oraz ewapotranspiracji, w kontekście dotychczasowych i prawdopodobnych strategii zarządzania tymi obszarami.

Metoda ET_{GW} umożliwia precyzyjne określenie ewapotranspiracji w okresach krótszych niż 1 doba (np. modyfikacja przedstawionej metody ET_{GW} zastosowana przez GRIBOWSKIEGO i in. [2010]), co może wpłynąć na znaczącą poprawę jakości modelowania przepływu płytkich wód podziemnych na obszarach mo-

kradeł. W warunkach mozaikowego krajobrazu użytkowanych łąk na torfowiskach niskich, gdzie obserwuje się sukcesję zbiorowisk zaroślowych, zróżnicowanie poboru wody przez zbiorowiska krzewiaste, leśne i łąkowe, może powodować przestrzenną zmienność położenia zwierciadła wód podziemnych i ewapotranspiracji. Zastosowanie metody ET_GW do szacowania ewapotranspiracji na obszarach o zmiennym użytkowaniu pozwala na bardzo precyzyjne uchwycenie wzajemnej zależności między intensywnością ewapotranspiracji, własnościami retencyjnymi gleby oraz typem roślinności. Może to stanowić wymierną podstawę do podejmowania decyzji w kwestiach ochrony zasobów wodnych, przez utrzymanie odpowiedniej kompozycji krajobrazu torfowisk.

Metodę ET_GW można również zastosować do uszczegółowienia opisu empirycznych współczynników roślinno-glebowo-wodnych w krytycznych okresach bezopadowych, kiedy w obliczu tzw. „stresu hydrologicznego” (mała zawartość wody w profilu glebowym), pomimo warunków meteorologicznych sprzyjających intensywnej ewapotranspiracji, intensywność parowania zmniejsza się. Stanowiłoby to rozwinięcie i kontynuację badań m.in. OLSZTY i in. [1990], ROGUSKIEGO i in. [1990, 2002] czy SZAJDY [1997].

Niewątpliwą wadą metody ET_GW jest ograniczenie możliwości jej stosowania wyłącznie do okresów bezopadowych, w których zasoby wód podziemnych siedliska mogą być potencjalnie zasilane wyłącznie w wyniku dopływu lateralnego. Zastosowanie zaprezentowanej metody jest również ograniczone do wybranych siedlisk o znanym typie zasilania, w którym wzajemne oddziaływanie dopływu bocznego i ewapotranspiracji w określonych warunkach wodno-glebowych powoduje zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych w cyklu dobowym.

Wyniki obliczeń ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie dobowych zmian stanu wód podziemnych w okresach bezopadowych wymagają niewątpliwie weryfikacji na większej liczbie prób. Wydaje się jednak, że ze względu na swoją charakterystykę, metoda ta stanowi dobrą alternatywę dla skomplikowanych metod lizymetrycznych, szczególnie w okresach bezopadowych, gdy stany wód podziemnych są krytycznie niskie. Zastosowanie metody ET_GW do szacowania ewapotranspiracji siedlisk bagiennych wymaga relatywnie niewielkich nakładów finansowych, ograniczonych zasadniczo do zakupu i prawidłowej instalacji automatycznych urządzeń do pomiaru stanów wód podziemnych w wysokiej rozdzielczości, zarówno pomiarowej (dokładność do milimetrów) jak i czasowej (do 1 godziny, choć spotykano w literaturze również krótsze, kilkuminutowe kroki pomiarowe [GRIBOVSKI i in. 2010]). Co więcej, kompozycja przestrzenna sieci monitoringu stanów wód podziemnych umożliwia precyzyjne określanie ewapotranspiracji rzeczywistej oraz współczynników roślinno-glebowo-wodnych siedlisk bagiennych w funkcji kompozycji krajobrazu czy składu gatunkowego nawet niewielkich obszarowo płatów roślinności. Dzięki temu możliwe wydaje się uszczegółowienie klasycznie szacowanego przestrzennego zróżnicowania ewapotranspiracji w celu określania bilansu wodnego siedlisk torfowiskowych i zgodne z wymogami ochro-

ny środowiska zarządzanie zasobami wodnymi torfowisk, przez utrzymanie odpowiedniej kompozycji ich krajobrazu.

WNIOSKI

1. Wyniki obliczeń ewapotranspiracji rzeczywistej metodą analizy wyskorozdzielczego czasowo hydrogramu stanów wód podziemnych (ET_GW) są porównywalne z wynikami otrzymanymi klasyczną metodą Penmana-Monteitha ze współczynnikami roślinnymi (ET_P-M+C). W zależności od okresu badań, różnice między wartościami ewapotranspiracji rzeczywistej oszacowanymi obydwoma metodami wyniosły od 11 (17–21.08.2008 r.) do 27% (1–7.09.2008 r.).

2. W metodzie ET_GW uwzględnia się aktualną sytuację hydrologiczną siedliska (dostępność wody w strefie korzeniowej roślin), co umożliwia dokładne oszacowanie ewapotranspiracji rzeczywistej w kontekście hydrologicznego stresu, występującego w krytycznych okresach bezopadowych, kiedy ewapotranspiracja rzeczywista jest mniejsza niż potencjalna.

3. Metoda ET_GW, w której wykorzystuje się wyskorozdzielczy hydrogram stanów wód podziemnych, umożliwia bezpośrednie oszacowanie ewapotranspiracji rzeczywistej w okresach bezopadowych nawet niewielkich obszarowo płatów roślinnych. Jest dużo tańsza niż skomplikowane metody lizymetryczne i umożliwia weryfikację dotychczas stosowanych i wyznaczenie nowych współczynników roślinno-glebowo-wodnych na podstawie badań w warunkach terenowych.

4. Wartości współczynników roślinno-glebowo-wodnych zakrzaczeń brzożowych obliczone jako stosunek ewapotranspiracji rzeczywistej wyznaczonej metodą analizy hydrogramu wód podziemnych i ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej metodą Penmana-Monteitha wyniosły 1,59 w okresie 17–21.08.2008, w którym średnia głębokość położenia zwierciadła wód podziemnych wynosiła 0,35 m; 1,31 w okresie 1–7.09.2008, w którym średnia głębokość położenia zwierciadła wód podziemnych wynosiła 0,45 m oraz 1,49 w okresie 5–9.08.2009, w którym średnia głębokość położenia zwierciadła wód podziemnych wynosiła 0,1 m.

5. Choć zastosowanie metody ET_GW jest ograniczone wyłącznie do okresów bezopadowych, może ona być z powodzeniem wykorzystywana do kalibracji modeli hydrologicznych opisujących sprzężenie zwrotne między ewapotranspiracją a stanami i przepływem wód podziemnych, szczególnie na obszarach mokradeł, w krótkich krokach obliczeniowych. Znajomość ewapotranspiracji rzeczywistej, występującej w danym, precyzyjnie określonym przestrzennie siedlisku o znanej (zmierzonej) dynamice zmian położenia zwierciadła wód podziemnych w danym okresie, umożliwia weryfikację warunku brzegowego 2 i 3 rodzaju wybranych modeli, opisujących zasilanie podziemne mokradeł.

Badania przeprowadzono w ramach projektu „Ochrona bioróżnorodności Czerwonego Bagna – reliktu wielkich torfowisk przejściowych Niziu Europejskiego” (PL-0082) dofinanso-

wanego ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz w ramach projektu HABIT-CHANGE 2CE168P3 realizowanego przez Biebrzański Park Narodowy, współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego w ramach programu Europa Środkowa. Autorzy składają podziękowania recenzentom, których merytoryczne uwagi i spostrzeżenia pozwoliły na uściślenie i usystematyzowanie przekazu niniejszej publikacji.

LITERATURA

- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D., SMITH M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Irrigation and Drainage Paper. No 56.
- BRANDYK T., SZATYŁOWICZ J. 2002. The influence of meadow abandonment on physical properties and water conditions of peat soils. W: Restoration of carbon sequestering capacity and biodiversity in abandoned grassland on peatland in Poland, Global Peatland Initiative WGP119GPI-9a. Pr. zbior. Red. P. Ilnicki. Poznań. AR s. 77–93.
- BRANDYK T., SZUNIEWICZ J., SZATYŁOWICZ J., CHRZANOWSKI S. 1996. Potrzeby wodne roślinności obszarów hydrogenicznych. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. T. 432 s. 91–104.
- CHRZANOWSKI S. 2002. Właściwości retencyjne gleb użytkowanych pod lasem i łąką na przykładzie torfowiska Łokieć. Woda Środowisko Obszary Wiejskie T. 2. z. 1. s. 101–114.
- CHURSKI T., SZUNIEWICZ J. 1991. Gleby hydrogeniczne i ich warunki fizyczno-wodne w Pradolinie Biebrzy. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Z. 372 s. 272–293.
- GRIBOVSZKI Z., SZILÁGYI J., KALICZ P. 2010. Diurnal fluctuations in shallow groundwater levels and streamflow rates and their interpretation – A review. Journal of Hydrology. Vol. 385 s. 372–383.
- GRYGORUK M., BATELAAN O., MIROSLAW-ŚWIĄTEK D., OKRUSZKO T. 2011a. Modelowanie ewapotranspiracji rzeczywistej torfowiska niskiego w okresie suszy z uwzględnieniem szaty roślinnej i kompozycji krajobrazu. W: Modelowanie procesów hydrologicznych. Mater. II Ogólnopol. Konf. Nauk. 19-20.10.2011 Wrocław. Wrocław. AR s. 17–18.
- GRYGORUK M., BATELAAN O., OKRUSZKO T., MIROSLAW-ŚWIĄTEK D., CHORMAŃSKI J., RYCHARSKI M. 2011b. Groundwater modelling and hydrological system analysis of wetlands in the Middle Biebrza Basin. W: Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment. Pr. zbior. Red. D. Mirosław-Świątek, T. Okruszko. Berlin-Heidelberg. Geoplanet: Earth and Planetary Sciences, Springer Verlag s. 89–109.
- HAYS K.B. 2003. Water use by saltcedar and associated vegetation on the Canadian, Colorado and Pecos Rivers in Texas. Master Thesis. Texas. Texas A&M University ss. 115.
- KACA E., KASPERSKA W. 2000. A method of calculating the value of crop-soil coefficient in a formula describing evapotranspiration of a 3-cut meadow. Journal of Water and Land Development. No 4 s. 137–150.
- LETTIS M.G., ROULET N.T., COMER N.T., SKARUPA M.R., VERSEGHY D.S. 2000. Parameterization of peatland hydraulic properties for the Canadian Land Surface Scheme. Atmosphere–Ocean. 38 (1) s. 141–160.
- LOHEIDE S.P., BUTLER J.J., GORELICK S.M. 2005. Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment. Water Resources Research. Vol. 41 s. 1–14.
- ŁABĘDZKI L., SZAJDA J., SZUNIEWICZ J. 1996. Ewapotranspiracja upraw rolniczych – terminologia, definicje, metody obliczania. Przegląd stanu wiedzy. Materiały Informacyjne. Nr 33. Falenty. IMUZ ss. 15.

- MIODUSZEWSKI W., SZUNIEWICZ J., KOWALEWSKI Z., CHRZANOWSKI S., ŚLESICKA A., BOROWSKI J. 1996. Gospodarka wodna na torfowisku w Basenie Środkowym Biebrzy. Biblioteczka Wiadomości IMUZ. Nr 90 ss. 80.
- MOULD D.J., FRAHM E., SALZMANN Th., MIEGEL K., ACREMAN M.C. 2010. Evaluating the use of diurnal groundwater fluctuations for estimating evapotranspiration in wetland environments: case studies in southwest England and northeast Germany. *Ecohydrology*. 3 s. 294–305.
- NACHABE M., SHAH N., ROSS M., VOMACKA J. 2005. Evapotranspiration of two vegetation covers in a shallow water table environment. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 69 s. 492–499.
- NICHOLS W.D. 1993. Estimating discharge of shallow groundwater by transpiration from greasewood in the Northern Great Basin. *Water Resources Research*. Vol. 29 s. 2771–2778.
- OLSZTA W., SZAJDA J., ZAWADZKI S., 1990. Wpływ ciśnienia ssącego gleby na wielkość ewapotranspiracji. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 390 s. 151–163.
- ROGUSKI W., ŁABĘDZKI L., WEYNA A. 1990. Zależność ewapotranspiracji użytków zielonych od wskaźnika klimatycznego (ETp), poziomu wody gruntowej, opadu i plonowania. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*. Z. 191 s. 9–14.
- ROGUSKI W., ŁABĘDZKI L., KASPERSKA W. 2002. Analiza wybranych wzorów do obliczania parowania wskaźnikowego na potrzeby nawadniania użytków zielonych. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*. T. 2 z. 1. s. 197–209.
- RYCHARSKI M., PIÓRKOWSKI H., KLOSS M., KUPRYJANOWICZ M., FIŁOC M., PIOTROWSKA N. 2010. Rozwój i warunki siedliskowe torfowiska Czerwone Bagno. Operat końcowy projektu „Ochrona bioróżnorodności Czerwonego Bagna – reliktu wielkich torfowisk wysokich Europy Środkowej” (PL 0082) ss. 95.
- SZAJDA J. 1997. Roślinne i glebowo-wodne wskaźniki ewapotranspiracji łąki na glebie torfowo-murszowej. *Rozprawy Habilitacyjne*. Falenty. IMUZ ss. 62.
- SZUNIEWICZ J. 1994. Characteristic of prognostic soil-moisture complexes in terms of parameters of melioration system. W: *Taxonomy of hydrogenic soils and sites used in Poland*. Biblioteczka Wiadomości IMUZ. 84 s. 35–57.
- SZUNIEWICZ J., CHRZANOWSKI S. 1996. Współczynniki roślinne do obliczania ewapotranspiracji łąki trzykośnej na glebie torfowo-murszowej w Polsce północno-wschodniej. *Wiadomości IMUZ*. T. 18 z. 4. s. 109–118.
- WHITE W.N. 1932. A method of estimating groundwater supplies based on discharge by plants and evaporation from soil. *USGS Water Supply Paper*. Nr 659.

*Mateusz GRYGORUK, Dorota MIROŚLAW-ŚWIĄTEK, Tomasz OKRUSZKO,
Okke BATELAAN, Jan SZATYŁOWICZ*

**ESTIMATION OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION
OF BIRCH THICKETS ON A FEN
BASED ON DIURNAL FLUCTUATIONS OF SHALLOW GROUNDWATER LEVEL**

Key words: evapotranspiration, ground water, peatland, the Biebrza, wetlands

S u m m a r y

In this paper the actual evapotranspiration of birch thicket on a fen meadow was calculated from the analysis of diurnal groundwater level fluctuations measured in shallow piezometer with a 1-h temporal resolution. Calculations were done for three selected rain-free periods (17–21.08.2008, 1–7.09.2008, 5–9.08.2009). Results of calculations were compared with the evapotranspiration esti-

mated with the reference evapotranspiration method corrected with vegetation coefficients. Actual evapotranspiration of birch thickets ranged from 19.2 mm (1–7.09.2008) to 25.1 mm (5–9.08.2009). A reasonable correspondence was observed for the two applied methods which differed by 11%, 19% and 27% for the periods 17–21.08.2008, 5–9.08.2009 and 1–7.09.2008, respectively. Plant-soil-water coefficients for the evaluation of actual evapotranspiration based on potential evapotranspiration for birch thickets were calculated as a ratio of actual evapotranspiration calculated with applied method and reference evapotranspiration calculated with the Penman-Monteith algorithm. The values of coefficients ranged from 1.59 for the period of 17–21.08.2008 at a mean groundwater depth of 0.35 m to 1.31 for the period 1–7.09.2008 at a mean groundwater depth of 0.45 m and to 1.49 for the period 5–9.08.2009 at a mean groundwater depth of 0.1 m. Presented method of estimating actual evapotranspiration based on groundwater hydrograph analysis provides opportunities for the verification and assessment of plant-soil-water coefficients in periods of hydrological stress and low groundwater level. It can also be applied in the calibration of hydrological models designed to quantify groundwater level dynamics induced by evapotranspiration.

Praca wpłynęła do Redakcji 12.07.2011 r.