

Wpłynęło 01.09.2015 r.
Zrecenzowano 28.01.2016 r.
Zaakceptowano 01.02.2016 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

WYZNACZANIE EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ UŻYTKÓW ZIELONYCH NA PODSTAWIE EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ I POTENCJAŁU WODY W GLEBIE

Jan SZAJDA¹⁾ ABCDEF, Leszek ŁABĘDZKI²⁾ DEF

¹⁾ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach

²⁾ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy

Streszczenie

W pracy przedstawiono syntetyczną analizę wyników badań lizymetrycznych ewapotranspiracji i plonowania użytków zielonych w naturalnych warunkach dostatku wody w glebie oraz w warunkach zróżnicowanego potencjału wody w glebach torfowo-murszowych i murszowatych w okresach suszy meteorologicznej umiarkowanej, silnej i ekstremalnej na Polesiu Lubelskim. Stwierdzono, że ewapotranspiracja rzeczywista użytków zielonych w warunkach optymalnej wilgotności gleby stanowi wskaźnik maksymalnych potrzeb wodnych, zależny od czynników meteorologicznych i maksymalnych plonów siana. Wyznaczono dla dekad i okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej w zależności od prognozowanych aktualnych i końcowych maksymalnych plonów siana. Wpływ wilgotności gleby na ewapotranspirację rzeczywistą w dekadach i okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określono wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} oraz zależnością k_{s1} od prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody w glebie. Wyznaczono dla dekad i okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX średnie dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} . Wyznaczone wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych są przydatne na etapie eksploatacji oraz projektowania urządzeń i systemów melioracyjnych.

Słowa kluczowe: ewapotranspiracja, potencjał wody w glebie, użytki zielone

Do cytowania For citation: Szajda J., Łabędzki L. 2016. Wyznaczenie ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie ewapotranspiracji maksymalnej i potencjału wody w glebie. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 16. Z. 1 (53) s. 71–92.

WSTĘP

Ewapotranspiracja rzeczywista użytków zielonych, czyli parowanie z powierzchni gleby (ewaporacja) i roślin (transpiracja) stanowi podstawowy składnik bilansu wodnego zależny od czynników meteorologicznych (promieniowania słonecznego, długości astronomicznej dnia, usłonecznienia, temperatury powietrza, niedosytu wilgotności powietrza, prędkości wiatru), plonów siana i związanej z nimi wielkości powierzchni parującej liści [WIT DE 1965] oraz wilgotności gleby. Dokładność oszacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na etapie bilansowania potrzeb wodnych użytków zielonych w istotnym stopniu decyduje o prawidłowości obliczenia pozostałych składników równania bilansu wodnego w okresach dekad i odrostów. Dlatego od dawna w wielu krajach, w tym w Polsce, prowadzono badania nad wypracowaniem metod oceny zużycia wody przez rośliny łąkowe, umożliwiającą uzyskanie wyników najbardziej zbliżonych do wartości rzeczywistych.

W niniejszej pracy przedstawiono syntetyczną analizę wyników badań lizymetrycznych ewapotranspiracji i plonowania użytków zielonych (łąki, pastwiska i runi łąkowej) na Polesiu Lubelskim w warunkach optymalnego i zróżnicowanego uwilgotnienia gleb pod kątem wyznaczania ewapotranspiracji rzeczywistej w dekadach i okresach V–V, VI–VII, VIII–IX wyraźnie różniących się pod względem warunków meteorologicznych. Dekadowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej są niezbędne do określania optymalnego poziomu wody gruntowej na etapie eksploatacji urządzeń i systemów melioracyjnych. Wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX są przydatne do bilansowania potrzeb wodnych użytków zielonych i obliczenia pozostałych składników równania bilansu wodnego na etapie projektowania melioracji.

W badaniach stwierdzono, że ewapotranspiracja rzeczywista użytków zielonych w warunkach optymalnej wilgotności gleby stanowi wskaźnik maksymalnych potrzeb wodnych, zależny od czynników meteorologicznych i maksymalnych plonów siana. Wielkość tych potrzeb w okresach dekadowych charakteryzują średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej zależne od dynamiki aktualnych maksymalnych plonów siana, natomiast wielkość zużycia wody w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określają średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej, zależne od końcowych maksymalnych plonów siana. Wpływ wilgotności gleby na ewapotranspirację rzeczywistą użytków zielonych charakteryzują wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} dla dekad i okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX, zależne od bezwzględnych wartości potencjału wody w glebie.

Celem niniejszej pracy jest:

- wyznaczenie dla dekad i okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX średnich dobowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych w zależności od czynników meteorologicznych oraz prognozowanych maksymalnych aktualnych i końcowych plonów siana;

- wyznaczenie wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} dla dekad i okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody glebowej;
- wyznaczenie dla dekad i okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX średnich dobowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} .

ZAKRES I METODY BADAŃ

Zakres badań obejmował:

- badania lizymetryczne na glebie torfowo-murszowej MtlIbb dekadowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej i końcowych plonów maksymalnych łąki 3-kośnej i pastwiska kwaterowego (6 odrostów) nawożonych na poziomie 3NPK (240 kg·ha⁻¹ N, 180 kg P₂O₅, 240 kg K₂O) w latach 1974–1981 w Sosnowicy; łąki 3-kośnej 2NPK (240 kg·ha⁻¹ N, 120 kg P₂O₅, 180 kg K₂O) i 1NPK (120 kg·ha⁻¹ N, 60 kg P₂O₅, 90 kg K₂O) oraz runi łąki koszonej co 10 dni (18-kośnej) nawożonej na poziomie 1NPK (120 kg·ha⁻¹ N, 60 kg P₂O₅, 90 kg K₂O) w latach 1982–1990 w Sosnowicy;
- badania lizymetryczne dekadowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej i końcowych plonów rzeczywistych łąki 3-kośnej 2NPK na glebie torfowo-murszowej MtlIbb w latach 1977–1994 w Sosnowicy, w warunkach ustalonej głębokości zalegania zwierciadła wody gruntowej $h = 40, 50, 60, 70, 90, 100, >100$ cm (bez wody gruntowej – przerwy podsiąk kapilarny na głębokości 110 cm) i dodatkowego zadaszania lizymetrów z poziomem wody $h = 70, 100, >100$ cm w latach 1989–1994 (symulacja warunków suszy hydrologicznej);
- pomiary potencjału wody glebowej w lizymetrach;
- badania połowe głębokości zwierciadła wody gruntowej i potencjału wody glebowej, określonego na podstawie wilgotności gleb torfowo-murszowych MtlIba, MtlIbb, MtlIbc, MtlIb1, MtlIcc oraz gleb mineralno-murszowych i murszowatych Mr42, Me33, Me22, Me11, Mi33, o zmiennej głębokości zalegania zwierciadła wody w latach 1976–1981 na Polesiu Lubelskim, w okresach suszy meteorologicznej umiarkowanej, silnej i ekstremalnej, spowodowanej występowaniem ciągów dni bezopadowych definiowanych wg KOZMIŃSKIEGO [1986].

Metody charakterystyki suszy meteorologicznej umiarkowanej, silnej i ekstremalnej, spowodowanej występowaniem ciągów dni bezopadowych, badań ewapotranspiracji, plonów i potencjału wody w glebach, oceny istotności różnic plonów i ewapotranspiracji łąki nawożonej na poziomie 3NPK, pastwiska nawożonego na poziomie 3NPK oraz łąk 2NPK, 1NPK i runi łąkowej nawożonej na poziomie 1NPK, charakterystyki związków funkcyjnych pomiędzy ewapotranspiracją i plo-

nowaniem a potencjałem wody w glebach oraz oceny istotności tych związków podano w innych pracach [SZAJDA 1987; 1997; 2006; 2009; 2011; 2014].

WYNIKI BADAŃ I ICH SYNTETYCZNA ANALIZA

ZALEŻNOŚĆ ŚREDNICH W DEKADACH DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ UŻYTKÓW ZIELONYCH OD AKTUALNYCH MAKSYMALNYCH PŁONÓW SIANA

Podstawę określenia zależności średnich w dekadach dobowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych od aktualnych maksymalnych plonów siana stanowiły przedstawione w innych pracach [SZAJDA 1987; 1997; 2006; 2009; 2011; 2014] wyniki badań lizymetrycznych dekadowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej ET_{\max} oraz końcowych plonów maksymalnych Q_{\max} łąki i pastwiska 3NPK w latach 1974–1981, łąki 2NPK i 1NPK oraz runi łąkowej 1NPK w latach 1982–1990, uzyskane w naturalnych warunkach dostatku wody w glebie na skutek zasilania łąki dopływem gruntowym z kanału Wieprz–Krzna [SZAJDA 1987; 1997]. Wyniki tych badań wykazały, że dopływ gruntowy w całości równoważył rozchody na ewapotranspirację nawet podczas lat ekstremalnie suchych, natomiast plony siana łąki 2NPK były podobne (różniły się nieistotnie) do plonów maksymalnych łąki 2NPK w warunkach optymalnej wilgotności warstwy korzeniowej w latach 1977–1994. Na tej podstawie końcowe plony siana Q łąki, pastwiska i runi łąkowej w latach 1974–1990 przyjęto za maksymalne Q_{\max} , natomiast ewapotranspirację rzeczywistą tych użytków zielonych ET – za ewapotranspirację maksymalną ET_{\max} .

Do określenia średnich w dekadach dobowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych oraz aktualnych maksymalnych plonów siana wykorzystano zmierzone dekadowe sumy ET_{\max} oraz plony końcowe Q_{\max} łąki, pastwiska i runi łąkowej. W tym celu dekadowe sumy ET_{\max} przeliczono na wartości średnie dobowe. Plony końcowe runi łąkowej Q_{\max} przyjęto za plony maksymalne q_{\max} łąki i pastwiska wiosną po ruszeniu wegetacji oraz na początku poszczególnych okresów wzrostu łąki i pastwiska, plony końcowe pastwiska Q_{\max} za plony maksymalne q_{\max} w czasie przyrostu łąki, natomiast plony końcowe łąki Q_{\max} za końcowe plony maksymalne q_{\max} w okresach charakterystycznych (IV–V, VI–VII, VIII–IX). Średnie w dekadzie dobowe wartości ET_{\max} ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) oraz odpowiadające im q_{\max} ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) naniesiono na układ współrzędnych i wyznaczono równania regresji [SZAJDA 2006]:

– w okresie IV–V i w zakresie $q_{\max} = 0,01\text{--}8,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$ET_{\max} = 1,1319 + 0,7642 q_{\max} \quad r = 08283 \quad (1)$$

– w okresie VI–VII i w zakresie $q_{\max} = 0,18\text{--}8,54 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$ET_{\max} = 1,9305 + 0,5819 q_{\max} \quad r = 0,7864 \quad (2)$$

– w okresie VIII–IX i w zakresie $q_{\max} = 0,22\text{--}6,72 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$ET_{\max} = 0,3777 + 0,5160 q_{\max} \quad r = 0,7583 \quad (3)$$

Zależności (1), (2), (3) stanowią podstawę wyznaczania średnich w dekadzie dobowych wartości ET_{\max} użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie prognozowanych aktualnych plonów siana w podanych przedziałach wartości q_{\max} .

**ZALEŻNOŚĆ ŚREDNICH DOBOWYCH WARTOŚCI
EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ UŻYTKÓW ZIELONYCH
W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX
OD KOŃCOWYCH MAKSYMALNYCH PLONÓW SIANA**

Podstawę oceny zależności średnich dobowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX od końcowych maksymalnych plonów siana stanowiły przedstawione w innych pracach [SZAJDA 1997; 2009; 2011; 2014] wyniki badań lizymetrycznych dekadowych wartości ewapotranspiracji maksymalnej ET_{\max} i plonów końcowych Q_{\max} łąki 3-końskiej 3NPK, 2NPK, 1NPK, pastwiska 3NPK i runi łąkowej 1NPK. Średnie dobowe wartości ET_{\max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX obliczono jako iloraz sumy dekadowych wartości ET_{\max} w tych okresach i liczby dni w okresach. Plony Q_{\max} łąki, pastwiska i runi łąkowej zestawiono dla okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX. W każdym z tych okresów plonom łąki odpowiadały sumy plonów dwóch odrostów pastwiska i sześciu odrostów runi łąkowej. Wartości ET_{\max} w tych okresach ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) oraz odpowiadające im plony końcowe Q_{\max} ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) naniesiono na układ współrzędnych oraz wyznaczono równania regresji [SZAJDA 2009]:

– w okresie IV–V i w zakresie $Q_{\max} = 1,38\text{--}12,25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$ET_{\max} = 0,2869Q_{\max} + 1,2385 \quad r = 0,8155 \quad (4)$$

– w okresie VI–VII i w zakresie $Q_{\max} = 1,69\text{--}8,54 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$ET_{\max} = 1,5441Q_{\max}^{0,5467} \quad R = 0,7287 \quad (5)$$

– w okresie VIII–IX i w zakresie $Q_{\max} = 1,31\text{--}6,72 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$ET_{\max} = 0,6068Q_{\max} + 0,6233 \quad r = 0,8015 \quad (6)$$

Zależności (4), (5), (6) stanowią podstawę wyznaczania wartości ET_{\max} użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie prognozowanych końcowych maksymalnych plonów siana w podanych przedziałach wartości Q_{\max} .

**WPLYW POTENCJAŁU WODY W GLEBIE NA ŚREDNIE W DEKADACH
DOBOWE WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ
W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX**

Podstawę określenia wpływu potencjału wody w glebie na średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej ET użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX stanowiły:

- badania lizymetryczne dekadowych wartości ewpotranspiracji rzeczywistej i końcowych plonów rzeczywistych łąki 3-kośnej 2NPK na glebie torfowo-murszowej MtlIbb w latach 1977–1994 w Sosnowicy, w warunkach ustalonej głębokości zalegania zwierciadła wody gruntowej $h = 40, 50, 60, 70, 90, 100, >100$ cm (bez wody gruntowej – przerwany podsiąk kapilarny na głębokości 110 cm) i dodatkowego zadaszania lizymetrów z poziomem wody $h = 70, 100, >100$ cm w latach 1989–1994 (symulacja warunków suszy hydrologicznej);
- pomiary potencjału wody glebowej w lizymetrach;
- badania polowe głębokości zwierciadła wody gruntowej i potencjału wody glebowej, określonego na podstawie wilgotności gleb torfowo-murszowych MtlIba, MtlIbb, MtlIbc, MtlIb1, MtlIcc oraz gleb mineralno-murszowych i murszowatych Mr42, Me33, Me22, Me11, Mi33, o zmiennej głębokości zalegania zwierciadła wody w latach 1976–1981 na Polesiu Lubelskim, w okresach suszy meteorologicznej umiarkowanej, silnej i ekstremalnej, spowodowanej występowaniem ciągów dni bezopadowych definiowanych wg KOŹMIŃSKIEGO [1986]. Wyniki tych badań przedstawiono w innych pracach [SZAJDA 1997; 2011; 2014].

Wyniki te dowodzą, że w aktualnym układzie czynników meteorologicznych plon siana (końcowy oraz dynamika jego przyrostu) jest maksymalny, gdy w warstwie korzeniowej występuje optymalna wilgotność gleby, a podsiąk kapilarny wody gruntowej całkowicie równoważy rozchody wilgoci na ewapotranspirację. W warunkach wilgotności większej od optymalnej notowano zmniejszanie się plonów siana oraz nadmiarowe (luksusowe) zużycie wody na ewapotranspirację. Ewapotranspiracja rzeczywista zmierzona warunkach optymalnej wilgotności gleby charakteryzuje zatem największe, ekonomicznie uzasadnione zużycie wody, przyjmowane za ewapotranspirację maksymalną. W okresach suszy meteorologicznej pobieranie wody przez korzenie jest utrudnione, ponieważ czynnikiem ograniczającym wzrost roślin, a tym samym plon i ewapotranspirację, jest wilgotność gleby [FEDDES 1985; GASCA-TUCKER i in. 2007; KACA, KASPERSKA 2000; KUŹNIAR i in. 2011; ŁABĘDZKI 1997; ŁABĘDZKI, KASPERSKA 1994; MORAN i in. 2009; SZAJDA 1997; 2011; 2014; SZAJDA, OLSZTA 2000], określana udziałem obję-

tościowym wody w glebie lub jako potencjał wody w glebie F , wyrażony w ujemnych wartościach ciśnienia (hPa) i wartościach $pF = \log F$ [ZAWADZKI 1973].

Wpływ potencjału wody F na średnie w dekadzie dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określono za pomocą równania:

$$ET = k_{s1}(F)ET_{\max} \quad (7)$$

stąd:

$$k_{s1}(F) = \frac{ET}{ET_{\max}}, \quad 0 \leq k_{s1}(F) \leq 1 \quad (8)$$

gdzie:

ET = średnia w dekadzie dobowa wartość ewapotranspiracji rzeczywistej łąki w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w warunkach zróżnicowanego potencjału wody F , $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,

$k_{s1}(F)$ = współczynnik glebowo-wodny zależny od wartości F , obliczony w warunkach bezpośredniego oddziaływania potencjału wody F na wartość ewapotranspiracji;

ET_{\max} = średnia w dekadzie dobowa wartość ewapotranspiracji maksymalnej łąki w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX, określona empirycznie w warunkach, gdy $k_{s1} = 1$, $q = q_{\max}$, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;

F = największa bezwzględna wartość potencjału wody glebowej w czasie ciągów dni bezopadowych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wyznaczona w badaniach lizymetrycznych i polowych w glebach torfowo-murszowych i murszowatych w dekadach z suszą meteorologiczną umiarkowaną, silną i ekstremalną, hPa.

Dla wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} obliczonych za pomocą równania (8) oraz odpowiadających im wartości F w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wyznaczono równania regresji [SZAJDA 2011]:

– w okresie IV–V i w zakresie $F = (-586) \div (-32)$ hPa

$$k_{s1} = -0,0007 |F| + 0,9624 \quad r = 0,7162 \quad (9)$$

– w okresie VI–VII i w zakresie $F = (-10\ 000) \div (-13)$ hPa

$$k_{s1} = -0,1269 \ln |F| + 1,3893 \quad R = 0,8401 \quad (10)$$

– w okresie VIII–IX i w zakresie $F = (-15\ 850) \div (-15)$ hPa

$$k_{s1} = -0,0885 \ln |F| + 1,2068 \quad R = 0,8152 \quad (11)$$

Zależności (9), (10), (11) stanowią podstawę wyznaczania dekadowych wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie prognozowanych lub mierzonych bezwzględnych wartości potencjału wody glebowej w podanych przedziałach wartości F .

Wpływ bezwzględnej wartości potencjału wody w glebie w podanych przedziałach wartości F na średnie w dekadzie dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej ET w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określono, wprowadzając do równania (7) zależności (9), (10), (11):

– w okresie IV–V i w zakresie $F = (-586) \div (-32)$ hPa

$$ET = (-0,0007 |F| + 0,9624) ET_{\max} \quad (12)$$

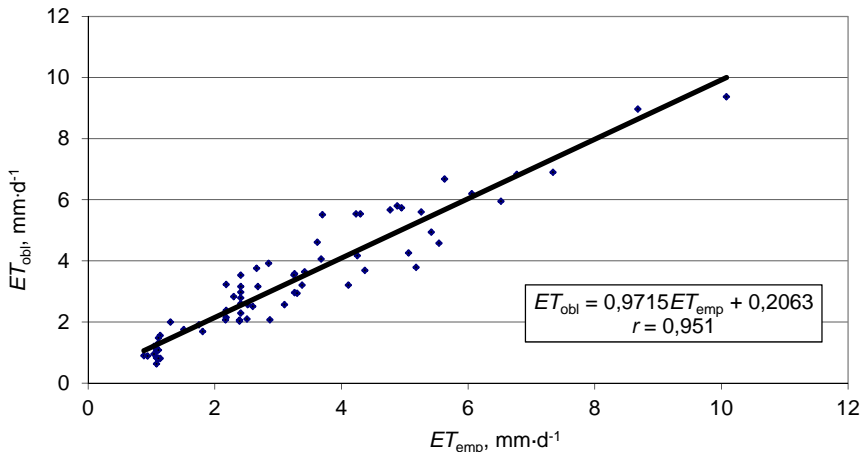
– w okresie VI–VII i w zakresie $F = (-10\ 000) \div (-13)$ hPa

$$ET = (-0,1269 \ln |F| + 1,3893) ET_{\max} \quad (13)$$

– w okresie VIII–IX i w zakresie $F = (-15\ 850) \div (-15)$ hPa

$$ET = (-0,0885 \ln |F| + 1,2068) ET_{\max} \quad (14)$$

Dokonano również empirycznej weryfikacji równań (12), (13), (14) pod kątem przydatności do oceny średnich w dekadzie dobowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie



Rys. 1. Związek średnich w dekadach dobowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej obliczonych (ET_{obl}) za pomocą równań (12), (13), (14) i określonych empirycznie (ET_{emp}) w okresie IV–IX [SZAJDA 2011]; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Relationship between mean daily actual evapotranspiration calculated (ET_{obl}) and measured (ET_{emp}) in the period April–September [SZAJDA 2011]; source: own study

zmniejszenia ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} . Do tego celu wykorzystano wartości ET_{max} określone w lizymetrach oraz wartości F zmierzone w lizymetrach i w badaniach polowych. Za pomocą równań (12), (13), (14) obliczono średnie w dekadach dobowe wartości ET_{obl} oraz porównano je z wartościami empirycznymi ET_{emp} . Współczynnik korelacji wartości ET_{emp} i ET_{obl} ($r = 0,951$) w okresie IV–IX świadczy o dużej zgodności kierunku zmian porównywanych wartości (rys. 1). Wartości ET_{emp} i ET_{obl} różnią się tylko nieznacznie. Równania (12), (13), (14) są zatem bardzo przydatne do obliczeń średnich w dekadzie dobowych wartości ET w odrostach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie zmniejszania ET_{max} , wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} .

WPLYW POTENCJAŁU WODY W GLEBIE NA ŚREDNIE DOBOWE WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX

Wpływ potencjału wody F na średnie dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określono za pomocą równania:

$$ET = k_{s1}(F)ET_{max} \quad (15)$$

stąd:

$$k_{s1}(F) = \frac{ET}{ET_{max}}, \quad 0 \leq k_{s1}(F) \leq 1 \quad (16)$$

gdzie:

ET = średnia w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX dobowa wartość ewapotranspiracji rzeczywistej łąki w warunkach zróżnicowanego potencjału wody w glebie F , $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,

$k_{s1}(F)$ = współczynnik glebowo-wodny zależny od wartości F , obliczony w warunkach bezpośredniego oddziaływania potencjału wody F na wartość ewapotranspiracji;

ET_{max} = średnia w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX dobowa wartość ewapotranspiracji maksymalnej łąki określona empirycznie w warunkach $k_{s1} = 1$, $Q = Q_{max}$, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;

F = największa bezwzględna wartość potencjału wody glebowej w czasie ciągów dni bezopadowych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wyznaczona w badaniach lizymetrycznych i polowych w glebach torfowo-murszowych i murszowatych w okresach suszy meteorologicznej umiarkowanej, silnej i ekstremalnej, hPa.

Dla obliczonych za pomocą równania (16) wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} oraz odpowiadających im wartości F w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wyznaczono równania regresji [SZAJDA 2014]:

– w okresie IV–V i w zakresie $F = (-794) \div (-40)$ hPa

$$k_{s1} = -0,0005 |F| + 0,9695 \quad r = 0,8514 \quad (17)$$

– w okresie VI–VII i w zakresie $F = (-10\ 000) \div (-23)$ hPa

$$k_{s1} = -0,1241 \ln |F| + 1,4654 \quad R = 0,9068 \quad (18)$$

– w okresie VIII–IX i w zakresie $F = (-15\ 850) \div (-15)$ hPa

$$k_{s1} = -0,1309 \ln |F| + 1,5323 \quad R = 0,8914 \quad (19)$$

Zależności (17), (18), (19) stanowią podstawę wyznaczania współczynników glebowo-wodnych k_{s1} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie prognozowanych lub zmierzonych bezwzględnych wartości potencjału wody glebowej w podanych przedziałach wartości F .

Wpływ bezwzględnej wartości potencjału wody w glebie w podanych przedziałach wartości F na średnią dobową wartość ewapotranspiracji rzeczywistej ET użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określono, wprowadzając do równania (15) zależności (17), (18), (19):

– w okresie IV–V i w zakresie $F = (-794) \div (-40)$ hPa

$$ET = (-0,0005 |F| + 0,9695) ET_{\max} \quad (20)$$

– w okresie VI–VII i w zakresie $F = (-10\ 000) \div (-23)$ hPa

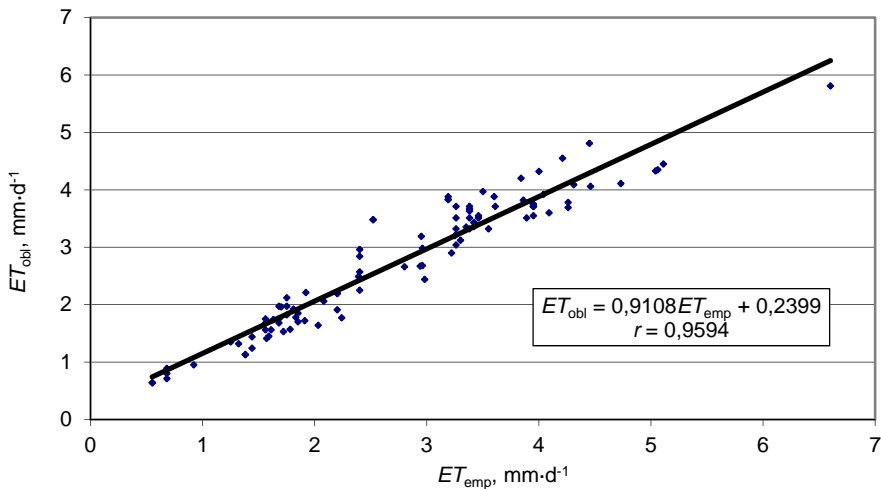
$$ET = (-0,1241 \ln |F| + 1,4654) ET_{\max} \quad (21)$$

– w okresie VIII–IX i w zakresie $F = (-15\ 850) \div (-15)$ hPa

$$ET = (-0,1309 \ln |F| + 1,5323) ET_{\max} \quad (22)$$

Dokonano również empirycznej weryfikacji równań (20), (21), (22) pod kątem przydatności do oceny ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} . Do tego celu wykorzystano wartości ET_{\max} określone w lizymetrach oraz wartości F zmierzone w lizymetrach i w badaniach polowych. Za pomocą równań (20), (21), (22) obliczono średnie dobowe wartości ET_{obi} oraz porównano je z wartościami empi-

rzeczywnymi ET_{emp} (rys. 2). Współczynnik korelacji wartości ET_{emp} i ET_{obl} ($r = 0,9594$) w okresie IV–IX świadczy o dużej zgodności kierunku zmian porównywanych wartości. Wartości ET_{emp} i ET_{obl} różnią się tylko nieznacznie. Równania (20), (21), (22) są zatem bardzo przydatne do obliczeń średniej dobowej wartości ET w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie zmniejszania wartości ET_{max} wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_s .



Rys. 2. Związek średnich w odrostach dobowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej obliczonych (ET_{obl}) i określonych empirycznie (ET_{emp}) w okresie IV–IX; źródło: wyniki własne

Fig. 2. Relationship between mean daily actual evapotranspiration calculated (ET_{obl}) and measured (ET_{emp}) in the period April–September; source: own studies

WYZNACZANIE ŚREDNICH W DEKADACH DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ UŻYTKÓW ZIELONYCH W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX

WYZNACZANIE ŚREDNICH W DEKADACH DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX W ZALEŻNOŚCI OD PROGNOZOWANYCH AKTUALNYCH MAKSYMALNYCH PŁONÓW SIANA

Średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych ET_{max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od prognozowanych aktualnych maksymalnych plonów siana q_{max} obliczono za pomocą równania (1) w okresie IV–V, równania (2) w okresie VI–VII, równania (3) w okresie VIII–IX (tab. 1). Wyniki obliczeń wskazują, że średnie w dekadach dobowe wartości ET_{max} różnicują się w zależności od czynników meteorologicznych oraz od progno-

zowanych aktualnych maksymalnych plonów siana q_{\max} . Średnie dekadowe wartości ET_{\max} są na ogół największe w okresie VI–VII, mniejsze w okresie IV–V, a najmniejsze w okresie VIII–IX, podobnie jak wielkości promieniowania słonecznego i astronomicznej długości dnia [KOWALIK 1976; ROGUSKI i in. 1988] oraz temperatury i niedosytu wilgotności powietrza [SZAJDA i in. 2007]. Średnie dekadowe wartości ET_{\max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX zwiększają się wraz z aktualnym maksymalnym plonem siana q_{\max} na skutek powiększania się powierzchni parującej liści wraz z wielkością plonu [WIT DE 1965].

Tabela 1. Średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej ET_{\max} użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od prognozowanych aktualnych maksymalnych plonów siana q_{\max}

Table 1. Daily 10-day mean maximum grassland evapotranspiration ET_{\max} in the periods IV–V, VI–VII, VIII–IX in dependence on predicted current maximum hay yield q_{\max}

Okres Period	Ewapotranspiracja ET_{\max} (mm·d ⁻¹), gdy q_{\max} (t·ha ⁻¹)							
	Evapotranspiration ET_{\max} (mm·d ⁻¹) for q_{\max} (t·ha ⁻¹)							
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,5	6,0	7,0	8,5
IV–V	1,51	1,90	2,66	3,42	4,57	5,72	6,48	–
VI–VII	2,22	2,51	3,09	3,68	4,55	5,42	6,00	6,88
VIII–IX	0,64	0,89	1,41	1,93	2,70	3,47	–	–

Objaśnienia: „–” wartości ET_{\max} nie notowane w okresie badań.

Explanations: „–” ET_{\max} values did not occur during measurements.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych stanowią wskaźnik dynamiki maksymalnych potrzeb wodnych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w warunkach optymalnego uwilgotnienia gleby (tab. 1). Wskaźnik ten odnosi się do warunków zrównoważonego bilansu wodnego, w których rozchody wody na ewapotranspirację są całkowicie zrównoważone przez podsiąk kapilarny [KOWALIK, ZARADNY 1978; ŁABĘDZKI 1997; ZARADNY 1993], a w glebie utrzymuje się charakterystyczna wilgotność warstwy korzeniowej, odpowiadająca $pF = 1,9$ w okresie IV–V, $pF = 1,7$ w okresie VI–VII i $pF = 2,1$ w okresie VIII–IX [SZAJDA 1997; 2009; 2011; 2014; SZAJDA i in. 2006; SZAJDA, OLSZTA 2005]. Wskaźnik ten jest niezbędny do wyznaczania ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w dekadach na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} dla dekad [SZAJDA 2011].

**WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW GLEBOWO-WODNYCH k_{s1} DLA DEKAD
W ZALEŻNOŚCI OD PROGNOZOWANEJ BEZWZGLĘDNEJ WARTOŚCI
POTENCJAŁU WODY W GLEBIE**

Wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} dla dekad w zależności od prognozowanej bezwzględnej wartości potencjału wody w glebie w podanych przedziałach wartości F obliczyć można za pomocą równań (9), (10), (11). Wartości współczynników k_{s1} obliczono za pomocą równania (9) w okresie IV–V dla bezwzględnych wartości F równych 100, 300, 500 hPa, równania (10) w okresie VI–VII, gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000$ hPa i równania (11) w okresie VIII–IX, gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000, 15\ 000$ hPa (tab. 2). Do obliczeń wartości współczynników k_{s1} za pomocą równań (9), (10), (11) można wykorzystać bezpośrednio pomiary potencjału wody w glebie F . Do tego celu należy przyjąć największe bezwzględne wartości F zmierzone w okresach ciągów dni bezopadowych w danej dekadzie.

Tabela 2. Współczynniki glebowo-wodne k_{s1} dla dekad w zależności od prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody F

Table 2. Soil-water coefficients k_{s1} in the 10-days periods in dependence on predicted absolute values of soil water potential F

Okres Period	Współczynnik k_{s1} , gdy $ F $ (hPa)					Coefficient k_{s1} for $ F $ (hPa)			
	100	300	500	700	1 000	4 000	8 000	10 000	15 000
IV–V	0,89	0,75	0,61	–	–	–	–	–	–
VI–VII	0,80	0,67	0,60	0,56	0,51	0,34	0,25	0,22	–
VIII–IX	0,80	0,70	0,66	0,63	0,59	0,47	0,41	0,39	0,36

Objaśnienia, jak pod tabelą 1. Explanations as under Table 1.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Z obliczeń wynika, że bezwzględne wartości potencjału wody w glebie F w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wywierają istotny wpływ na wartości dekadowych współczynników glebowo-wodnych k_{s1} . Dekadowe wartości k_{s1} maleją, gdy bezwzględne wartości potencjału wody F się zwiększają. Podana w pracy charakterystyka liczbowa tego zróżnicowania potwierdza istotny wpływ bezwzględnej wartości potencjału wody glebowej F na średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej, co jest zgodne z wynikami badań innych autorów [KACA, KASPERSKA 2000; GASCA-TUCKER i in. 2007; MORAN i in. 2009; KUŹNIAR i in. 2011]. Charakterystyka ta może być wykorzystana do wyznaczania średnich w dekadach dobowych wartości ewpotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego podaną w tabeli 2. wartością współczynników k_{s1} .

**WYZNACZANIE ŚREDNICH W DEKADACH
DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ
UŻYTKÓW ZIELONYCH
NA PODSTAWIE ZMNIEJSZANIA EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ
WYRAŻONEGO WARTOŚCIĄ WSPÓŁCZYNNIKÓW k_{s1}**

Zgodnie z równaniami (7), (12), (13), (14) średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej ET użytków zielonych wyznaczono na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} w funkcji potencjału wody w glebie F . Wartości ET wyznaczone na podstawie zmniejszania wartości ET_{max} zestawionych w tabeli 1., wyrażonego wartością współczynników k_{s1} w funkcji potencjału wody w glebie

Tabela 3. Średnia w dekadach dobowa ewapotranspiracja rzeczywistej użytków zielonych ET w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od ewapotranspiracji maksymalnej ET_{max} i prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody w glebie F

Table 3. Daily 10-day mean evapotranspiration of grasslands ET in the periods IV–V, VI–VII, VIII–IX in dependence on maximum evapotranspiration ET_{max} and predicted absolute values of soil water potential F

Okres Period	ET_{max} mm·d ⁻¹	Ewapotranspiracja ET (mm·d ⁻¹), gdy $ F $ (hPa) Evapotranspiration ET (mm·d ⁻¹) for $ F $ (hPa)								
		100	300	500	700	1 000	4 000	8 000	10 000	15 000
IV–V	1,51	1,34	1,13	0,92	–	–	–	–	–	–
	1,90	1,69	1,42	1,16	–	–	–	–	–	–
	2,66	2,37	1,99	1,62	–	–	–	–	–	–
	3,42	3,04	2,56	2,09	–	–	–	–	–	–
	4,57	4,07	3,43	2,79	–	–	–	–	–	–
	5,72	5,09	4,29	3,49	–	–	–	–	–	–
	6,48	5,77	4,86	3,95	–	–	–	–	–	–
VI–VII	2,22	1,78	1,49	1,33	1,24	1,13	0,75	0,55	0,49	–
	2,51	2,01	1,68	1,51	1,41	1,28	0,85	0,63	0,55	–
	3,09	2,47	2,07	1,85	1,73	1,58	1,05	0,77	0,68	–
	3,68	2,94	2,47	2,21	2,06	1,88	1,25	0,92	0,81	–
	4,55	3,64	3,05	2,73	2,55	2,32	1,55	1,14	1,00	–
	5,42	4,34	3,63	3,25	3,03	2,76	1,84	1,35	1,19	–
	6,00	4,80	4,02	3,60	3,36	3,06	2,04	1,50	1,32	–
6,88	5,50	4,61	4,13	3,85	3,51	2,34	1,72	1,51	–	
VIII–IX	0,64	0,51	0,45	0,42	0,40	0,38	0,30	0,26	0,25	0,23
	0,89	0,71	0,62	0,59	0,56	0,52	0,42	0,36	0,35	0,32
	1,41	1,13	0,99	0,93	0,89	0,83	0,66	0,58	0,55	0,51
	1,93	1,54	1,35	1,27	1,22	1,14	0,91	0,79	0,75	0,79
	2,70	2,16	1,89	1,78	1,70	1,59	1,27	1,11	1,05	0,97
	3,47	2,78	2,43	2,29	2,19	2,04	1,63	1,42	1,35	1,25

Objaśnienia, jak pod tabelą 1. Explanations as under Table 1.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

F (tab. 2), gdy bezwzględne wartości potencjału wody F są równe 100, 300, 500 hPa w okresie IV–V, wartością współczynników k_{s1} , gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000$ hPa w okresie VI–VII, wartością współczynników k_{s1} , gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000, 15\ 000$ hPa w okresie VIII–IX zestawiono w tabeli 3.

Średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wyznaczone na podstawie zmniejszenia ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} są ściśle skorelowane z wartościami zmierzonymi w lizymetrach (rys. 1). Różnicują się one w zależności od ewapotranspiracji maksymalnej oraz bezwzględnej wartości potencjału wody w glebie. Wartości te zwiększają się wraz z wielkością ewapotranspiracji maksymalnej oraz maleją, gdy zwiększa się bezwzględna wartość potencjału wody w glebie.

Średnie w dekadach dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej odniesione do warunków całkowitego pokrycia gleby roślinnością oraz zrównoważonego bilansu wodnego stanowią wskaźnik optymalnego poziomu wody gruntowej, w warunkach którego rozchody wody na ewapotranspirację są całkowicie zrównoważone przez podsiąk kapilarny [KOWALIK, ZARADNY 1978; ŁABĘDZKI 1997; ZARADNY 1993], a w glebie utrzymuje się charakterystyczna wilgotność warstwy korzeniowej, odpowiadająca $pF = 1,9$ w okresie IV–V, $pF = 1,7$ w okresie VI–VII i $pF = 2,1$ w okresie VIII–IX [SZAJDA 1997; 2009; 2011; 2014; SZAJDA i in. 2006; SZAJDA, OLSZTA 2005]. Mogą one być wykorzystane do określania optymalnego poziomu wody gruntowej w glebach torfowo-murszowych i murszowatych [SZAJDA 2009] na etapie eksploatacji urządzeń i systemów melioracyjnych oraz do dalszych badań nad wyznaczaniem optymalnego poziomu wody gruntowej.

WYZNACZANIE ŚREDNICH DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ UŻYTKÓW ZIELONYCH W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX

WYZNACZANIE ŚREDNICH DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX NA PODSTAWIE PROGNOZOWANYCH MAKSYMALNYCH KOŃCOWYCH PŁONÓW SIANA

Średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych ET_{\max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX obliczone w zależności od prognozowanych maksymalnych końcowych plonów siana Q_{\max} za pomocą: równania (4) w okresie IV–V, równania (5) w okresie VI–VII, równania (6) w okresie VIII–IX zestawiono w tabeli 4. Wskazują one, że średnie dobowe wartości ET_{\max} w omawianych okresach różnicują się w zależności od czynników meteorologicznych i prognozowanych końcowych maksymalnych plonów siana Q_{\max} . Wartości ET_{\max}

Tabela 4. Średnia dobowa ewapotranspiracja maksymalna użytków zielonych ET_{\max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od prognozowanych maksymalnych końcowych plonów siana Q_{\max}

Table 4. Re-growth daily mean maximum evapotranspiration of grasslands ET_{\max} in the periods IV–V, VI–VII, VIII–IX in dependence on predicted maximum hay yield Q_{\max}

Okres Period	Ewapotranspiracja ET_{\max} (mm·d ⁻¹), gdy Q_{\max} (t·ha ⁻¹)							
	Evapotranspiration ET_{\max} (mm·d ⁻¹) for Q_{\max} (t·ha ⁻¹)							
	2	3	4	5	6	8	10	12
IV–V	1,81	2,10	2,39	2,67	2,96	3,53	4,11	4,68
VI–VII	2,25	2,81	3,29	3,72	4,08	4,79	–	–
VIII–IX	1,84	2,44	3,05	3,67	4,26	–	–	–

Objaśnienia, jak pod tabelą 1. Explanations as under Table 1.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

dla prognozowanych plonów Q_{\max} są na ogół największe w okresie VI–VII, mniejsze w okresie VIII–IX, a najmniejsze w okresie IV–V, podobnie jak wartości promieniowania słonecznego i astronomicznej długości dnia [KOWALIK 1976; ROGUSKI i in. 1988] oraz temperatury i niedosytu wilgotności powietrza [SZAJDA i in. 2007]. Wartości ET_{\max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX zwiększają się wraz z końcowym maksymalnym plonem siana Q_{\max} , gdyż wraz z wielkością plonu zwiększa się powierzchnia parująca liści [WIT DE 1965].

Średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej użytków zielonych ET_{\max} w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX (tab. 4) w warunkach optymalnego uwilgotnienia gleby stanowią wskaźnik maksymalnych potrzeb wodnych. Wskaźnik ten odnosi się do warunków zrównoważonego bilansu wodnego, w których rozchody wody na ewapotranspirację są całkowicie równoważone przez podsiąk kapilarny [KOWALIK, ZARADNY 1978; ŁABĘDZKI 1997; ZARADNY 1993], a w glebie utrzymuje się charakterystyczna wilgotność warstwy korzeniowej, odpowiadająca $pF = 1,9$ w okresie IV–V, $pF = 1,7$ w okresie VI–VII i $pF = 2,1$ w okresie VIII–IX [SZAJDA 1997; 2009; 2011; 2014; SZAJDA i in. 2006; SZAJDA, OLSZTA 2005]. Wskaźnik ten jest niezbędny do wyznaczania średnich w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX dobowych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} w tych okresach [SZAJDA, 2014].

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW GLEBOWO-WODNYCH k_{s1} DLA OKRESÓW IV–V, VI–VII, VIII–IX W ZALEŻNOŚCI OD PROGNOZOWANEJ BEZWZGLĘDNEJ WARTOŚCI POTENCJAŁU WODY W GLEBIE

Wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} dla okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od prognozowanej bezwzględnej wartości potencjału wody w glebie w podanych przedziałach wartości F obliczyć można za pomocą równań

(17), (18), (19). Wartości współczynników k_{s1} obliczono za pomocą równania (17) w okresie IV–V dla bezwzględnych wartości F równych 100, 300, 500 hPa, równania (18) w okresie VI–VII, gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000$ hPa i równania (19) w okresie VIII–IX, gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000, 15\ 000$ hPa (tab. 5). Do obliczeń wartości współczynników k_{s1} za pomocą równań (17), (18), (19) można wykorzystać bezpośrednie pomiary potencjału wody w glebie lub wartości F określone z wykorzystaniem metod tele-detekcyjnych. Do tego celu należy przyjąć największe bezwzględne wartości F zmierzone w okresach ciągów dni bezopadowych w danym okresie.

Tabela 5. Współczynniki glebowo-wodne k_{s1} dla okresów IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody F

Table 5. Soil-water coefficients k_{s1} in the periods IV–V, VI–VII, VIII–IX in dependence on predicted absolute values of soil water potential F

Okres Period	Współczynnik k_{s1} , gdy $ F $ (hPa)					Coefficient k_{s1} for $ F $ (hPa)				
	100	300	500	700	1 000	4 000	8 000	10 000	15 000	
IV–V	0,92	0,82	0,72	0,62	–	–	–	–	–	
VI–VII	0,89	0,76	0,69	0,65	0,61	0,44	0,35	0,32	–	
VIII–IX	0,93	0,79	0,72	0,67	0,63	0,45	0,36	0,33	0,27	

Objaśnienia, jak pod tabelą 1. Explanations as under Table 1.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Z obliczeń wynika (tab. 5), że bezwzględne wartości potencjału wody w glebie F w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX wywierają istotny wpływ na wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} . Wartości k_{s1} maleją, gdy bezwzględne wartości potencjału wody F się zwiększają. Podana w pracy charakterystyka liczbowa tego zróżnicowania potwierdza istotny wpływ bezwzględnej wartości potencjału wody glebowej F na średnie w okresach dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej, co jest zgodne z wynikami badań innych autorów [GASCA-TUCKER i in. 2007; KACA, KASPERSKA 2000; KUŹNIAR i in. 2011; MORAN i in. 2009]. Charakterystyka ta może być wykorzystana do wyznaczania ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w odrostach na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej wyrażonego podaną (tab. 5) wartością współczynników k_{s1} .

**WYZNACZANIE ŚREDNICH DOBOWYCH WARTOŚCI EWAPOTRANSPIRACJI
RZECZYWISTEJ UŻYTKÓW ZIELONYCH W OKRESACH IV–V, VI–VII, VIII–IX
NA PODSTAWIE ZMNIEJSZANIA EWAPOTRANSPIRACJI MAKSYMALNEJ
WYRAŻONEGO WARTOŚCIĄ WSPÓŁCZYNNIKÓW k_{s1}**

Zgodnie z równaniami (15), (20), (21), (22) średnie dobowe wartość ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych ET w okresach IV–V, VI–VII, VIII–

IX wyznaczono na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników glebowo-wodnych k_{s1} w funkcji potencjału wody w glebie F . Wartości ET wyznaczone na podstawie zmniejszania wartości ET_{max} zestawionych w tabeli 4., wyrażonego wartością współczynników k_{s1} w funkcji potencjału wody w glebie F (tab. 5), gdy bezwzględne wartości potencjału wody F są równe 100, 300, 500 hPa w okresie IV–V, wartością współczynników k_{s1} , gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000$ hPa w okresie VI–VII, wartością współczynników k_{s1} , gdy $F = 100, 300, 500, 700, 1\ 000, 4\ 000, 8\ 000, 10\ 000, 15\ 000$ hPa w okresie VIII–IX zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Średnia dobowa ewapotranspiracja rzeczywista użytków zielonych ET w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX w zależności od ewapotranspiracji maksymalnej ET_{max} i prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody F

Table 6. Re-growth daily mean actual evapotranspiration of grasslands ET in the periods IV–V, VI–VII, VIII–IX in dependence on maximum evapotranspiration ET_{max} and predicted absolute value of soil water potential F

Okres Period	ET_{max} mm·d ⁻¹	Ewapotranspiracja ET (mm·d ⁻¹), gdy $ F $ (hPa) Evapotranspiration ET (mm·d ⁻¹) for $ F $ (hPa)								
		100	300	500	700	1 000	4 000	8 000	10 000	15 000
IV–V	1,81	1,66	1,48	1,30	1,12	–	–	–	–	–
	2,10	1,93	1,72	1,51	1,30	–	–	–	–	–
	2,39	2,20	1,96	1,72	1,48	–	–	–	–	–
	2,67	2,46	2,19	1,92	1,65	–	–	–	–	–
	2,96	2,72	2,43	2,13	1,83	–	–	–	–	–
	3,53	3,25	2,89	2,54	2,19	–	–	–	–	–
	4,11	3,78	3,37	2,96	2,55	–	–	–	–	–
4,68	4,31	3,84	3,37	2,90	–	–	–	–	–	
VI–VII	2,25	2,00	1,71	1,55	1,46	1,37	0,99	0,79	0,72	–
	2,81	2,50	2,14	1,94	1,83	1,71	1,24	0,98	0,90	–
	3,29	2,92	2,50	2,27	2,14	2,00	1,45	1,15	1,05	–
	3,72	3,31	2,83	2,57	2,42	2,27	1,64	1,30	1,19	–
	4,08	3,63	3,10	2,81	2,65	2,49	1,79	1,43	1,31	–
	4,79	4,26	3,64	3,30	3,11	2,92	2,11	1,68	1,53	–
VIII–IX	1,84	1,71	1,45	1,32	1,23	1,16	0,82	0,66	0,56	0,50
	2,44	2,27	1,93	1,76	1,63	1,54	1,10	0,88	0,80	0,66
	3,05	2,84	2,41	2,20	2,04	1,92	1,37	1,10	1,01	0,82
	3,67	3,41	2,90	2,64	2,46	2,31	1,65	1,32	1,21	0,99
	4,26	3,96	3,36	3,07	2,85	2,68	1,92	1,53	1,41	1,15

Objaśnienia, jak pod tabelą 1. Explanations as under Table 1.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Wyznaczone średnie dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej, wyrażonego wartością współczynników k_{s1} (tab. 6), róż-

nicują się w zależności od ewapotranspiracji maksymalnej oraz bezwzględnej wartości potencjału wody w glebie. Zwiększają się one wraz z wartością ewapotranspiracji maksymalnej oraz maleją, gdy zwiększa się bezwzględna wartość potencjału wody w glebie. Wartości te są silnie skorelowane z wartościami zmierzonymi w lizymetrach (rys. 2). Zapewnia to dokładność szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na etapie bilansowania potrzeb wodnych użytków zielonych oraz w istotnym stopniu decyduje o prawidłowości obliczenia pozostałych składników równania bilansu wodnego.

WNIOSKI

1. Ewapotranspiracja rzeczywista użytków zielonych w warunkach optymalnego uwilgotnienia gleby stanowi wskaźnik maksymalnych potrzeb wodnych, zależny od czynników meteorologicznych i maksymalnych plonów siana.

2. Wpływ czynników meteorologicznych i maksymalnych plonów siana na ewapotranspirację rzeczywistą użytków zielonych w okresach dekadowych charakteryzują średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej, wyznaczone w zależności od prognozowanych aktualnych maksymalnych plonów siana (tab. 1).

3. Wpływ wilgotności gleby na ewapotranspirację rzeczywistą użytków zielonych w okresach dekadowych charakteryzują dekadowe wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} wyznaczone w zależności od prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody glebowej (tab. 2).

4. Wpływ czynników meteorologicznych, maksymalnych plonów siana i wilgotności gleby na średnie dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych określono na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej wyrażonego wartością współczynników k_{s1} (tab. 3). Wartości te są ściśle skorelowane z wartościami zmierzonymi w lizymetrach (rys. 1). Stanowią one wskaźnik głębokości optymalnego poziomu wody gruntowej w glebach torfowo-murszowych i murszowatych, przydatny na etapie eksploatacji urządzeń i systemów melioracyjnych oraz do dalszych badań nad wyznaczaniem optymalnego poziomu wody gruntowej.

5. Wpływ czynników meteorologicznych i maksymalnych plonów siana na ewapotranspirację rzeczywistą użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX charakteryzują średnie dobowe wartości ewapotranspiracji maksymalnej, wyznaczone w zależności od prognozowanych końcowych maksymalnych plonów siana (tab. 4).

6. Wpływ wilgotności gleby na ewapotranspirację rzeczywistą użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX charakteryzują wartości współczynników glebowo-wodnych k_{s1} wyznaczone w zależności od prognozowanych bezwzględnych wartości potencjału wody glebowej (tab. 5).

7. Wpływ czynników meteorologicznych, maksymalnych plonów siana i wilgotności gleby na średnie dobowe wartości ewpotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych w okresach IV–V, VI–VII, VIII–IX określono na podstawie zmniejszania ewapotranspiracji maksymalnej wyrażonego wartością współczynników k_{s1} (tab. 6). Wartości te są ściśle skorelowane z wartościami zmierzonymi w lizymetrach (rys. 2). Zapewnia to dokładność szacowania ewapotranspiracji rzeczywistej na etapie bilansowania potrzeb wodnych użytków zielonych oraz w istotnym stopniu decyduje o prawidłowości obliczenia pozostałych składników równania bilansu wodnego.

BIBLIOGRAFIA

- FEDDES R.A. 1985. Crop water use and dry matter production: state of the art. Technical Bulletin. No 63 ss.15.
- GASCA-TUCKER D.L., ACREMAN M.C., AGNEW C.T., THOMPSON J.R. 2007. Estimating evaporation from a wet grassland. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 11(1) s. 270–282.
- 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. 193–208.
- KOWALIK P. 1976. Podstawy teoretyczne agrohydrologii Żuław [Theoretical principles of Żuław agrohydrology]. *Acta Technica Gedanensia*. No 11. ISSN 0065-1664 ss. 97.
- KOWALIK P., ZARADNY H. 1978. Simulation model of the soil water dynamics for layered soil profile with fluctuating water table and water uptake by roots. *Journal of Hydrology Science*. Vol. 5. No 2. s. 133–142.
- KOŹMIŃSKI Cz. 1986. Przestrzenny i czasowy rozkład okresów bezopadowych trwających ponad 15 dni na terenie Polski [Spatial and temporal distribution of above 15 day long period without rainfalls in the territory of Poland]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 268 s. 37–52.
- KUŹNIAR A., TWARDY S., KOWALCZYK A., KOSTUCH M. 2011. An assessment of water requirements of the mountain pasture swards in the Polish Western Carpathians. *Journal of Water and Land Development*. No. 15 s. 193–208.
- ŁABĘDZKI L. 1997. Potrzeby nawadniania użytków zielonych – uwarunkowania przyrodnicze i prognozowanie [Needs for grassland irrigation – natural determinants and forecasting]. *Rozprawy Habilitacyjne*. Falenty. Wydaw. IMUZ. ISBN 83-85735-51-8 ss. 147.
- ŁABĘDZKI L., KASPERSKA W. 1994. Ewapotranspiracja i plonowanie użytków zielonych w warunkach suszy meteorologicznej i glebowej [Grassland evapotranspiration and yielding under atmosphere and soil drought conditions]. *Materiały XXV Zjazdu Agrometeorologów*. Olsztyn–Mierki, 27–29.09.1994. Olsztyn. Wydaw. ART s. 99–107.
- MORAN M.S., SCOTT R.L., KEEFER T.O., EMMERICH W.E., HERNANDEZ M., NEARING G.S., PAIGE G.B., COSH M.H., O'NEILL P.E. 2009. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. No 149 s. 59–72.
- ROGUSKI W., SARNACKA S., DRUPKA S. 1988. Instrukcja wyznaczania potrzeb i niedoborów roślin uprawnych i użytków zielonych [Instruction for calculating water requirements and deficits of field crops and grassland]. *Materiały Instrukcyjne*. Nr 66. Falenty. IMUZ ss. 52.

- SZAJDA J. 1987. Udział dopływu gruntowego w pokrywaniu ewapotranspiracji łąki i pastwiska na glebie torfowo-murszowej w pobliżu Kanału Wieprz–Krzna [Share of groundwater inflow in covering evapotranspiration of meadows and pastures on peat-muck soil near Wieprz-Krzna Chanel]. *Prace Komitetu Naukowego PTG*. Nr 100 s. 55–68.
- SZAJDA J. 1997. Roślinne i glebowo-wodne wskaźniki ewapotranspiracji łąki na glebie torfowo-murszowej [Crop and soil-water indices of meadow evapotranspiration on peat-muck soil]. *Rozprawy Habilitacyjne*. Falenty. Wydaw. IMUZ. ISBN 83-85735-62-3 ss. 62.
- SZAJDA J. 2006. Ocena ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie plonu aktualnego [Evaluation of actual grassland evapotranspiration based on current yield]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* T. 6. Z. 1(16) s. 403–412.
- SZAJDA J. 2009. Przeciwdziałanie skutkom suszy meteorologicznej na glebach torfowo-murszowych i murszowatych [Counteracting the effects of meteorological drought in peat-muck and mucky soils]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. *Rozprawy naukowe i monografie*. Nr 26. ISBN 978-83-61875-05-5 ss. 75.
- SZAJDA J. 2011. Wpływ potencjału wody w glebie na ewapotranspirację i plonowanie użytków zielonych na glebach torfowo-murszowych i murszowatych w warunkach suszy meteorologicznej [The effect of water potential in soil on evapotranspiration and grassland yielding on peat-muck and mucky soils under meteorological drought]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. *Rozprawy naukowe i monografie*. Nr 32. ISBN 978-83-62416-31-8 ss. 62.
- SZAJDA J. 2014. Wpływ potencjału wody w glebie na ewapotranspirację i plonowanie użytków zielonych [The effect water potential in soil on grassland evapotranspiration and yielding]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 14. Z. 4(48) s. 95–122.
- SZAJDA J., CZERWIŃSKI M., JAKIMIUK S. 2007. Ocena suszy meteorologicznej w okresie wegetacyjnym na Polesiu Lubelskim na podstawie wybranych wskaźników [An assessment of meteorological drought in the growing season in Lublin Polesie with selected indices]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 7. Z. 2a(20) s. 316–326.
- SZAJDA J., OLSZTA W. 2000. Influence of sucking pressure of soil water on evapotranspiration and meadow yielding [The role of physical and physicochemical properties of soils in functioning of ecosystems]. *Acta Agrophysica*. No 35 s. 183–190.
- SZAJDA J., OLSZTA W. 2005. Optymalny poziom wody gruntowej jako czynnik skutecznej ochrony zmeliorowanych ekosystemów torfowiskowych w okresach posusznych [Optimum ground water level as a factor in the effective protection of meliorated peat ecosystems in dry periods]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 5. Z. specj. (14) s. 301–313.
- SZAJDA J., OLSZTA W., GRZYWNA A. 2006. Optymalna głębokość wody gruntowej w glebach murszowatych zapewniająca duże uwilgotnienie warstwy korzeniowej łąki [The optimum ground water depth in mucky soils providing high moisture of the meadow rhizosphere]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 6. Z. 2(18) s. 359–372.
- WIT C.T. DE 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Verslagen Landbouwk. Onderzouwk. Reports*. No 633. Wageningen. PUDOC ss. 56
- ZARADNY H. 1993. Groundwater flow in saturated and unsaturated soil. *Rotterdam A. A. Balkema* ss. 279.
- ZAWADZKI S. 1973. Laboratoryjne oznaczanie zdolności retencyjnych utworów glebowych [Laboratory determination of retentional properties of soils]. *Wiadomości IMUZ*. T. 11. Z. 2 s. 11–31.

Jan SZAJDA, Leszek ŁABĘDZKI

**DETERMINATION OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION OF GRASSLAND
ON THE BASIS
OF MAXIMUM EVAPOTRANSPIRATION AND SOIL WATER POTENTIAL**

Key words: *evapotranspiration, grasslands, soil water potential*

S u m m a r y

Synthetic analysis of the results of lysimeter investigations on evapotranspiration and yielding of 3-cut meadow and pasture under natural soil water supply and different soil water potential in peat-moorsh and moorsh soils, in periods of moderate, severe and extreme meteorological droughts, carried out in Polesie Lubelskie, is presented in the paper. It has been shown that grassland actual evapotranspiration under optimum soil moisture conditions ensuring maximum hay field is an indicator of the maximum water demand, dependent on meteorological factors and maximum hay yield. Mean in decades and periods IV–V, VI–VII, VIII–IX daily values of maximum evapotranspiration in dependence on predicted current and final maximum hay field are determined. Effect of soil moisture on actual evapotranspiration is quantified by soil-water coefficients k_{s1} for decades and periods IV–V, VI–VII, VIII–IX and their dependence on predicted absolute soil water potential value. Daily 10-day and periods IV–V, VI–VII, VIII–IX mean actual evapotranspiration is determined by reduction of maximum evapotranspiration by soil-water coefficients k_{s1} . Determined grassland actual evapotranspiration can be useful in an assessment of water demand for designing and exploitation of irrigation-drainage devices and systems on grasslands.

Adres do korespondencji: prof. dr hab. Leszek Łabędzki, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy ITP, ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz; tel. +48 52 375-01-45, e-mail: l.labeledzki@itp.edu.pl

