INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr III/1/2015, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 515–531
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

DOI: http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2015.3.1.041

METODA WSKAŹNIKOWEJ OCENY I KLASYFIKACJI UWILGOTNIENIA GLEB TRWAŁYCH UŻYTKÓW ZIELONYCH W POLSCE

Leszek Łabędzki, Bogdan Bąk
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy

METHOD OF INDICATOR-BASED ASSESSMENT AND CLASSIFICATION OF SOIL MOISTURE ON PERMANENT GRASSLAND IN POLAND

Streszczenie

W pracy przedstawiono ocenę warunków uwilgotnienia gleby w siedliskach trwałych użytków zielonych w Polsce w oparciu o wyniki ogólnopolskiego monitoringu niedoboru i nadmiaru wody prowadzonego przez Instytut Technologiczno-Przyrodniczy od 2013 r. Ocenę dokonano na podstawie wartości wskaźnika uwilgotnienia gleby *SMI* (Soil Moisture Index), obliczanego na koniec dekady okresu wegetacyjnego kwiecień-wrzesień i przyjętej autorskiej, 5-stopniowej klasyfikacji uwilgotnienia. Wskaźnik umożliwia porównanie warunków uwilgotnienia w glebach o różnych zdolnościach retencyjnych i obiektywną ocenę intensywności suszy glebowej oraz stanów nadmiernego uwilgotnienia. Wyniki monitoringu prowadzonego w latach 2013-2014 dla trwałych użytków zielonych w siedlisku mokrym, wilgotnym, posusznym i suchym wykazały, że w siedliskach mokrych i wilgotnych wilgotność gleby utrzymywała się najczęściej na poziomie optymalnego uwilgotnienia, a warunki meteorologiczne w niewielkim stopniu wpływały na wartości wskaźnika *SMI*. Siedliska posuszne, a zwłaszcza suche charakteryzowały się większym zróżnicowaniem uwilgotnienia gleb, przeważały okresy z suszą glebową. Spowodowane to

było mniejszą retencją gleb w obu siedliskach, większym uzależnieniem wilgotności gleby od opadów i wpływem innych czynników meteorologicznych.

Słowa kluczowe: wilgotność gleby, wskaźnik uwilgotnienia gleby *SMI*, trwałe użytki zielone

Summary

Assessment of soil moisture conditions on permanent grassland in Poland is made within the nationwide monitoring of water deficit and surplus in agriculture performed by Institute of Technology and Life Sciences from 2013. Soil moisture index SMI is used to categorize soil moisture in the end of each 10-day period during the vegetation period (April-September), using the original classification proposed by the authors. SMI enables the comparison of moisture conditions in soils with different water retention and the objective evaluation of soil drought and water excess. Assessment is made for grassland in wet, moist, periodically dry and dry habitats in 2013-2014. In wet and moist habitats soil moisture was in the optimal range for grassland plants and meteorological conditions affected in small degree. In periodically and dry habitats soil moisture was more differentiated and was affected by actual meteorological conditions greater. Soil droughts dominated.

Key words*: soil moisture, soil moisture index SMI, permanent grassland*

WSTĘP

Powierzchnia trwałych użytków zielonych wynosiła w 2013 r. w Polsce 3207 tys. ha, z tego 2565 tys. ha trwałych łąk i 642 tys. ha trwałych pastwisk (Rocznik … 2014). Trwałe użytki zielone występują i są uprawiane przede wszystkim w dolinach rzecznych na hydrogenicznych glebach torfowo-murszowych i mineralno-murszowych. Gospodarowanie na użytkach zielonych ma za zadanie głównie wysoką, ciągłą i równomierną w ciągu sezonu wegetacyjnego produkcję paszy dobrej jakości. Do spełnienia tej funkcji niezbędna jest odpowiednia ilość wody (w glebie, roślinie i atmosferze), która – poza nawożeniem – jest podstawowym czynnikiem plonotwórczym. Dostępność wody dla roślin użytków zielonych jest nierozerwalnie związana z warunkami pluwialnymi, zdolnością retencjonowania wody w glebie oraz warunkami wodnymi siedlisk, w których te użytki występują. Warunki wodne siedlisk trwałych użytków zielonych wynikają ze sposobu dopływu i występowania wody w siedlisku, uzależnionych od położenia siedliska, ukształtowania powierzchni oraz warun-

ków hydrologicznych i hydrogeologicznych terenu, na którym dane siedlisko się znajduje.

Warunki meteorologiczne w Polsce cechuje duża zmienność przestrzenna i czasowa, co powoduje dużą zmienność czasową i przestrzenną warunków uwilgotnienia trwałych użytków zielonych. W okresie wegetacyjnym często występującym zjawiskiem jest susza meteorologiczna. Suszę glebową można uznać jako pierwsze następstwo niedoboru opadu i suszy meteorologicznej. Zjawisko to występuje znacznie szybciej i jest intensywniejsze na glebach o mniejszych zdolnościach retencjonowania wody. Intensywność suszy glebowej, w warunkach niedostatecznych opadów lub ich braku, zależy również od innych czynników meteorologicznych determinujących wielkość ewapotranspiracji, takich jak temperatura i wilgotność powietrza, promieniowanie słoneczne, zachmurzenie i prędkość wiatru. Długotrwałej suszy glebowej towarzyszy często susza hydrologiczna. Problem jednoczesnego występowania obu rodzajów susz jest szczególnie istotny na użytkach zielonych. Są to obszary w znacznej części zmeliorowane, głównie wyposażone w odwadniające systemy melioracyjne, które w tym okresie ulegają przesychaniu z powodu braku wody w rowach i kanałach melioracyjnych. Bezpośrednim skutkiem suszy glebowej i hydrologicznej jest zakłócenie naturalnego bilansu wodnego danego obszaru.

Susza glebowa najczęściej charakteryzowana jest stanem uwilgotnienia gleby, który można skwantyfikować: wilgotnością gleby, potencjałem wody glebowej lub zapasem wody w profilu glebowym. Według Somorowskiego (1965, 1970) (za Jaworskim i in. 2002) susza glebowa pojawia się wówczas, gdy zapas wody w górnej warstwie aeracji jest mniejszy od 70% zapasu w stanie polowej pojemności wodnej. Według Łabędzkiego (2006) za kryterium wystąpienia suszy glebowej przyjmuje się spadek potencjału wody glebowej poniżej wartości – 0,1 MPa (pF = 3,0) lub poniżej wartości odpowiadających zakresowi pF = 2,7–3,2, lub odpowiadający temu krytycznemu poziomowi potencjału spadek wilgotności gleby poniżej wilgotności krytycznej bądź wyczerpanie zapasu wody łatwo dostępnej. Powyższe kryteria są tożsame, gdyż oznaczają ograniczenie dostępności wody dla roślin, a różnią się wyłącznie ujęciem matematycznym.

O ile parametry suszy meteorologicznej są często mierzone w rozległych sieciach pomiarowych narodowych służb meteorologicznych, o tyle dostęp do parametrów suszy glebowej jest znacznie trudniejszy. Najczęściej dane pomiarowe charakteryzują lokalne siedlisko i są reprezentatywne dla małych obszarów. W nielicznych przypadkach dane pochodzą z rozległej sieci pomiarowej, takiej jak np. istniejąca w stanie Nebraska, USA (Hunt i in. 2008). Możliwość zdobywania bieżących informacji o wilgotności gleby na dużych obszarach, głównie jej wierzchniej (czynnej) warstwy, umożliwiły dopiero metody teledetekcyjne z wykorzystaniem technologii GIS (Ciołkosz i in. 2004; Dąbrowska i in. 2010).

Przestrzenną ocenę warunków wilgotnościowych gleb najczęściej prowadzi się metodą wskaźnikową. W latach 90. w Zakładzie Agrometeorologii

IMGW opracowano kompleksowy wskaźnik agrometeorologiczny, który składał się z siedmiu kryteriów wyznaczania suszy glebowej (Słota i in. 1992). W przypadku spełnienia zadanego kryterium, każdy z tych wskaźników przyjmował wartość jednego punktu. Wzrastająca suma punktów świadczyła o postępującej intensywności suszy. Z naukowego punktu widzenia taka analiza miała dużą wartość poznawczą, ocenę suszy przeprowadzano bowiem zarówno z punktu widzenia przyczyny (susza meteorologiczna) oraz skutków (susza glebowa), natomiast w praktyce wskaźnik ten był mało praktyczny.

Najbardziej znanym w literaturze i stosowanym w wielu krajach świata wskaźnikiem służącym do oceny wpływu warunków meteorologicznych na zapasy wody w glebie jest wskaźnik Palmera *PDSI* (*Palmer Drought Severity Index*) (Alley 1984; Guttman 1998). Danymi potrzebnymi do wyznaczenia tego wskaźnika są bieżące opady i temperatura powietrza, a do jego obliczania wykorzystuje się co najmniej 30-letnie ciągi pomiarowe tych parametrów. Palmer zastosował standaryzację wartości wskaźnika, co pozwoliło, podobnie jak w przypadku wskaźnika standaryzowanego opadu *SPI,* na obiektywne porównywanie okresów suszy, okresów przeciętnych warunków wilgotnościowych i okresów wilgotnych w różnych miejscach i w różnych przedziałach czasu. Najczęściej wskaźnik *PDSI* służy do oceny intensywności suszy, która jest klasyfikowana za pomocą pięciu klas intensywności zjawiska. Okres suszy został zdefiniowany jako okres, w czasie którego wilgotność gleby w danej lokalizacji utrzymuje się poniżej wartości średniej wieloletniej wilgotności gleby.

W literaturze można spotkać jeszcze inne wskaźniki, opracowane głównie z uwzględnieniem warunków krajowych lub lokalnych (Vermes 1998). W 1968 roku powstał wskaźnik *CMI* (*Crop Moisture Index*) (Marracchi 2000), który służy do oceny krótkoterminowych zmian wilgotności w okresach tygodniowych w wydzielonych klimatycznych regionach USA. Ten wskaźnik jest obliczany na podstawie temperatury powietrza i opadów. Zmianę wilgotności ocenia się poprzez porównanie wartości wskaźnika w bieżącym i poprzednim tygodniu (Vermes 1998). Dla obszaru Węgier i Karpat Palfai (Palfai i in. 1995) opracował wskaźnik *PAI* uwzględniający opad, ewapotranspirację roślin, zapasy wody glebowej i głębokość wody gruntowej. Canarache i Dumitru (2000) zmodyfikowali ten wskaźnik, wprowadzając łączny współczynnik glebowy *KS.* Uwzględnia on zapas wody łatwo dostępnej, możliwości dostępu roślin do wody gruntowej, stopień zasolenia gleby i odpływ powierzchniowy. Zaproponowana modyfikacja wskaźnika uwzględniała fakt przewagi na terenie Rumunii obszarów o dużej zmienności nachylenia oraz różnorodność występujących gleb. Posługując się tak zmodyfikowaną wersją wskaźnika *PAIs* sporządzono mapy zagrożenia suszą w Rumunii.

W Polsce od niedawna stosowany jest wskaźnik uwilgotnienia gleby *SMI* (Soil Moisture Index) zaproponowany przez Hunta i in. (2008). Wskaźnik ten został zaadaptowany do warunków Polski przez Łabędzkiego i Bąka (2013)

i włączony do operacyjnego wykorzystania w ogólnopolskim monitoringu niedoboru i nadmiaru wody prowadzonego przez Instytut Technologiczno-Przyrodniczy od 2013 r. Jednym z elementów monitoringu jest właśnie ocena warunków uwilgotnienia gleby w Polsce, którą dokonuje się na koniec dekad okresu wegetacyjnego kwiecień–październik.

Bieżące oceny warunków uwilgotnienia gleby dla trwałych użytków zielonych w siedlisku mokrym, wilgotnym, posusznym i suchym a także dla różnych upraw rolniczych dla 4 kategorii ciężkości gleb oraz 10 – i 20-dniowe prognozy są dostępne na stronach internetowych Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego: http://agrometeo.itp.edu.pl lub www.itp.edu.pl, zakładka: Monitoring Agrometeo. Są one dostępne co dekadę w miesiącach kwiecień-październik.

Celem pracy jest prezentacja metody oceny uwilgotnienia gleb przy użyciu wskaźnika uwilgotnienia gleb *SMI*, wprowadzenie klasyfikacji tej oceny oraz zbadanie częstotliwości występowania różnych stanów uwilgotnienia gleb trwałych użytków zielonych w latach 2013-2014 przy zastosowaniu tej metody.

OPIS METODY I PROCEDURY OBLICZENIOWE

Ocena warunków uwilgotnienia gleby dokonywana jest na podstawie wartości wskaźnika uwilgotnienia gleby *SMI* (Soil Moisture Index) (Hunt i in. 2008), obliczanego na koniec kolejnej dekady okresu wegetacji według wzoru:

$$SMI = -5 + 10\frac{ZWU_k^t}{ZWU} \tag{1}$$

gdzie:
ZWU_k^t – zapas wody użytecznej w warstwie korzeniowej gleby na końcu doby t, mm;
ZWU – zapas wody użytecznej w warstwie korzeniowej gleby, mm, obliczany jako różnica zapasu wody w stanie polowej pojemności wodnej (pF = 2,0) i w punkcie trwałego więdnięcia (pF = 4,2).

Metoda ta bazuje na założeniu, że ewapotranspiracja zmniejsza się, kiedy zapas wody w glebie będzie mniejszy od 50% zapasu wody użytecznej. Po przekroczeniu tego progu redukcja ewapotranspiracji jest liniowa. Wartość $SMI = 0{,}0$ dzieli zakres wilgotności gleby na warunki braku stresu wodnego ($SMI \geq 0$; brak suszy) i warunki stresu wodnego ($SMI < 0$; susza). *SMI* zmienia się od – 5 do 5, chociaż może również przyjmować wartości większe od 5,0 i mniejsze od – 5,0. W pierwszym przypadku występuje duże uwilgotnienie gleby, kiedy wilgotność gleby jest powyżej stanu polowej pojemności wodnej. W drugim przypadku występują warunki wyjątkowe suche, kiedy został wyczerpany całkowicie zapas wody użytecznej i wilgotność gleby zmniejszyła się poniżej punktu trwałego więdnięcia. Tak zdefiniowany wskaźnik umożliwia porównanie warunków

uwilgotnienia w glebach o różnych zdolnościach retencyjnych i obiektywną ocenę intensywności suszy glebowej oraz stanów nadmiernego uwilgotnienia.

W celu skategoryzowania warunków uwilgotnienia gleby, w pracy zastosowano autorską 5-stopniową klasyfikację uwilgotnienia gleby (tab. 1).

Tabela 1. Klasyfikacja uwilgotnienia gleby na podstawie *SMI*
Table 1. Classification of soil moisture according to *SMI*

Wartość *SMI* Value of *SMI*	Klasa uwilgotnienia gleby Soil moisture class
≥ 5,00	nadmierne uwilgotnienie excessive soil moisture
[0,00; 5,00)	optymalne uwilgotnienie optimum soil moisture
[-2,00; 0,00)	susza glebowa umiarkowana moderate soil drought
[-5,00; – 2,00)	susza glebowa silna severe soil drought
< – 5,0	susza glebowa ekstremalna extreme soil drought

źródło: opracowanie własne; source: own study

Do wyznaczenia aktualnego zapasu wody w glebie zastosowano równanie bilansu wodnego gleby z krokiem czasowym jednej doby. Zapas wody użytecznej w korzeniowej warstwie gleby ZWU_k^t jest obliczany z równania:

$$ZWU_k^t = ZWU_p^t + P^t + q^t - ET^t = ZWU_p^{t+1} \tag{2}$$

gdzie:
ZWU_k^t, ZWU_p^t – zapas wody użytecznej na końcu i na początku doby t w warstwie korzeniowej, mm;
P^t – opad w dobie t, mm;
q^t – dopływ wody gruntowej do warstwy korzeniowej w dobie t, mm;
ET^t – ewapotranspiracja rzeczywista w dobie t, mm;
ZWU_p^{t+1} – zapas wody użytecznej na początku doby t+1 w warstwie korzeniowej, mm.

Ewapotranspirację rzeczywistą ET_t w dobie t oblicza się, stosując współczynnik roślinny k_c i współczynnik glebowo-wodny k_s (Allen i in. 1998):

$$ET^t = k_s^t \, k_c^t \, ET_o^t \tag{3}$$

gdzie:
ET_o^t – ewapotranspiracja wskaźnikowa wg Penmana-Monteitha w okresie doby t, mm;

k_c^t – współczynnik roślinny w dobie *t*;
k_s^t – współczynnik glebowo-wodny w dobie *t*, obliczany dla każdej doby symulacji jako stosunek zapasu wody użytecznej w glebie na początki doby ZWU_p^t (mm) do zapasu wody trudno dostępnej *ZWTD* (mm):

$$k_s^t = \frac{ZWU_p^t}{ZWTD} \qquad \text{gdy } ZWU_t^t < ZWTD \tag{4}$$

$$k_s^t = 1 \qquad \text{gdy } ZWU_p^t = ZWTD \tag{5}$$

W drugim przypadku (równanie (5)) występują warunki dostatecznego zaopatrzenia w wodę i

$$ET^t = k_c^t ET_o^t = ET_p^t \tag{6}$$

gdzie:
ET_p^t – ewapotranspiracja potencjalna w okresie doby *t*, mm.

Dla użytków zielonych zapas wody trudnodostępnej *ZWTD* w warstwie korzeniowej 0-30 cm oblicza się ze wzoru:

$$ZWTD = ZW_{WK} - ZW_{WTW} \tag{7}$$

gdzie:
ZW_{WK} – zapas wody w stanie wilgotności krytycznej, wyznaczony empirycznie przez Bieńkiewicza i in. (1983), mm;
ZW_{WTW} – zapas wody w stanie wilgotności trwałego więdnięcia (pF = 4,2), wyznaczony na podstawie krzywej pF, mm.

Zapas wody łatwo dostępnej dla roślin *ZWŁD* w warstwie korzeniowej 0-30 cm obliczono jako różnicę między zapasem w stanie polowej pojemności wodnej ZW_{PPW} i zapasem w stanie wilgotności krytycznej ZW_{WK}:

$$ZWŁD = ZW_{PPW} - ZW_{WK} \tag{8}$$

gdzie:
ZW_{PPW} – zapas wody w stanie polowej pojemności wodnej (pF=2,0), wyznaczony na podstawie krzywej pF, mm.

Ewapotranspirację wskaźnikową obliczono metodą Penmana-Monteitha, w której stosuje się wzór (Allen i in. 1998; Łabędzki i in. 2011, 2014):

$$ET_o = \frac{0{,}408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T+273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34u)} \tag{9}$$

gdzie:
ET_o – ewapotranspiracja wskaźnikowa, mm·d^{-1};
R_n – promieniowanie netto, MJ·m^{-2}·d^{-1};
T – temperatura powietrza, °C;
u – prędkość wiatru na wysokości 2 m, m·s^{-1};

Δ – nachylenie krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej, kPa·°C^{-1};
γ – stała psychrometryczna, kPa·°C^{-1};
e_a – ciśnienie pary wodnej, kPa;
e_s – ciśnienie pary wodnej nasyconej, kPa.

Współczynnik roślinny k_c, wykorzystywany do obliczenia ewapotranspiracji potencjalnej roślin dających wysoki plon, możliwy do osiągnięcia w warunkach dużego nawożenia i nielimitującego poziomu pozostałych czynników agrotechnicznych, wyraża wpływ zespołu czynników roślinnych (związanych z fazą rozwojową roślin) na ewapotranspirację w warunkach braku wpływu wilgotności gleby na natężenie tego procesu, czyli w przedziale stanów dostatecznego uwilgotnienia. Jego wartość zależy od fazy wzrostu i rozwoju rośliny oraz wielkości biomasy, czyli od wielkości plonu roślin. W pracy zastosowano współczynniki roślinne k_c określone dla kolejnych dekad okresu wegetacyjnego dostosowane do ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczanej metodą Penmana-Monteitha, jako stosunek ewapotranspiracji pomierzonej w warunkach dostatecznego uwilgotnienia gleby (potencjalnej) do ewapotranspiracji wskaźnikowej:

$$k_c = \frac{ET_p}{ET_o} \tag{10}$$

gdzie:
ET_p – ewapotranspiracja potencjalna pomierzona, mm;
ET_o – ewapotranspiracja wskaźnikowa wg Penmana-Monteitha, mm.

Wartości współczynników k_c dla łąki 3 – i 2-kośnej (tab. 2), wyznaczono według wzoru (10), w zależności od wielkości plonu końcowego siana, na podstawie pomiarów lizymetrycznych prowadzonych w latach 1972-1995 na glebie torfowo-murszowej MtIIIbb i mineralno-murszowej Mr11 w dolinie górnej Noteci, na madzie średniej pylastej F32 w dolinie Wisły oraz na glebie torfowo-murszowej MtIIbb na terenie Bydgoszczy (Kaca i in. 2003; Łabędzki 1997, 2006; Łabędzki, Kasperska 1994; Roguski, Łabędzki 1988).

ZASTOSOWANIE METODY

Symulacje zapasu wody w glebie oraz obliczenie wskaźnika SMI przeprowadzono dla warstwy gleby 0-30 cm, w której znajduje się główna masa korzeniowa roślinności użytków zielonych oraz okresów wegetacji (kwiecień-wrzesień) lat 2013 i 2014. Badaniami objęto trwałe użytki zielone w czterech hydrogenicznych siedliskach wilgotnościowych (mokrym A, wilgotnym B, posusznym C i suchym D), różniących się glebami, charakterem użytkowania (łąka 3 – i 2-kośna), plonem siana i warunkami zasilania gruntowego q (topogeniczne i soligeniczne) (tab. 3) (Kaca i in., 2003).

Tabela 2. Współczynniki k_c do wzoru Penmana-Monteitha dla kośnych użytków zielonych
Table 2. Crop coefficients k_c for the Penman-Monteith equation for cut grasslands

Miesiąc	Dekada	k_c dla plonu siana k_c for the hay yield			
Month	10-day period	łąka 3-kośna 3-cut meadow		łąka 2-kośna 2-cut meadow	
		10 Mg·ha^{-1}	8 Mg·ha^{-1}	7 Mg·ha^{-1}	5 Mg·ha^{-1}
Kwiecień	1	0,55	0,45	0,40	0,35
April	2	0,70	0,65	0,65	0,60
	3	0,85	0,80	0,80	0,70
Maj	1	0,95	0,85	0,90	0,80
May	2	1,05	1,00	1,00	0,90
	3	1,15	1,00	1,10	1,00
Czerwiec	1	0,55	0,45	1,20	1,10
June	2	0,75	0,50	0,50	0,40
	3	0,90	0,60	0,60	0,50
Lipiec	1	1,00	0,80	0,70	0,60
July	2	1,05	0,95	0,85	0,70
	3	1,10	1,10	1,00	0,85
Sierpień	1	0,75	0,60	1,05	0,95
August	2	0,95	0,90	1,10	1,00
	3	1,10	1,00	1,20	1,10
Wrzesień	1	1,10	1,00	0,90	0,90
September	2	1,10	1,00	0,90	0,90
	3	1,10	1,00	0,85	0,85

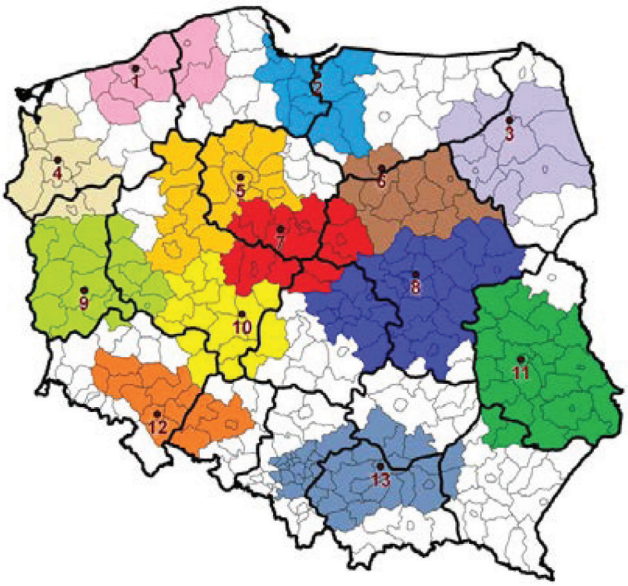
źródło: opracowanie własne; source: own studies

Wskaźnik *SMI* obliczany jest dla 13 regionów w Polsce wydzielonych dla celów monitoringu na podstawie analizy zróżnicowania klimatycznego Polski i warunków agroklimatycznych na obszarze kraju regionów (rys. 1, tab. 4). Granice regionów pokrywają się z granicami powiatów. Całkowita powierzchnia powiatów leżących w granicach tych regionów wynosi 204615 km^2. W każdym z tych regionów znajduje się automatyczna stacja meteorologiczna, z których dane pomiarowe zostały wykorzystane do prowadzonych symulacji.

Tabela 3. Charakterystyka badanych siedlisk użytków zielonych
Table 3. Characteristics of the studied grassland sites

Siedlisko Habitat	Gleba Soil	*ZWŁD* (mm)	*q* (mm×d^{-1})	Użytkowanie Usage	*Y* (Mg×ha^{-1})
Mokre A Wet A	torfowo-murszowa peat-moorsh MtIaa	150	1	łąka 3-kośna 3-cut meadow	10
Wilgotne B Moist B	torfowo-murszowa peat-moorsh MtIIbb	100	0,5	łąka 3-kośna 3-cut meadow	8
Posuszne C Periodically dry C	torfowo-murszowa peat-moorsh MtIIIbb	80	0,5	łąka 2-kośna 2-cut meadow	7
Suche D Dry D	torfowo-murszowa mineral-moorsh Mr21	50	0	łąka 2-kośna 2-cut meadow	5

ZWŁD – zapas wody łatwo dostępnej w warstwie 0-30 cm, readily available soil water in the layer 0-30 cm
q – zasilanie wodą gruntową, groundwater feeding
Y – plon siana, hay yield
źródło: opracowanie własne; source: own studies



źródło: opracowanie własne; source: own studies

Rysunek 1. Wybrane regiony agroklimatyczne w Polsce; ● – stacja meteorologiczna
Figure 1. Selected agroclimatic regions in Poland, ● – meteorological station

Tabela 4. Lokalizacja automatycznych stacji meteorologicznych
Table 4. Location of automatic meteorological stations

Nr regionu Region No.	Stacja Station	Wysokość (m n.p.m.) Altitude (m a.s.l.)	Szerokość geograficzna Latitude	Długość geograficzna Longitude	Region Region
1	Koszalin	32	54°12’	16°09’	środkowopomorski
2	Władysławowo	-3	54°10’	19°19’	Żuławy
3	Biebrza	103	53°39’	22°34’	mazursko-podlaski
4	Pyrzyce	23	53°14’	14°57’	zachodniopomorski
5	Bydgoszcz	66	53°06’	18°01’	bydgosko-toruński, środkowowielkopolski
6	Białuty	168	53°12’	20°23’	północne Mazowsze
7	Samszyce	93	53°36’	18°42’	Kujawy
8	Warszawa	107	52°08’	20°55’	środkowomazowiecki
9	Zielona Góra	182	51°56’	15°30’	lubuski
10	Kalisz	140	51°44’	18°05’	południowowielkopolski
11	Lublin	171	51°14’	22°34’	podlasko-poleski
12	Niemcza	273	50°43’	16°45’	dolnośląski
13	Proszowice	210	50°12’	20°17’	śląsko-krakowski

źródło: opracowanie własne; source: own studies

W wyniku przeprowadzonych symulacji określono częstotliwość występowania stanów uwilgotnienia gleby w poszczególnych klasach według przyjętych kryteriów. Obliczono ją jako stosunek liczby dekad (okresów 10/11-dniowych), w których wartości *SMI* znajdowały się w przedziałach poszczególnych klas (tab. 1) do liczby wszystkich dekad (36).

W badanym wieloleciu we wszystkich regionach w Polsce dominowało optymalne uwilgotnienie gleby (tab. 5). Tylko w dwóch regionach – podlasko-poleskim (stacja Lublin) i na północy Mazowsza (stacja Białuty) – w siedlisku suchym najczęściej pojawiała się umiarkowana susza glebowa. W warunkach meteorologicznych w Polsce, jakie występowały w okresie wegetacyjnym w latach 2013–2014, w siedlisku mokrym tylko w rejonie Lublina stwierdzono suszę glebową umiarkowaną w 6% dekad. W siedlisku mokrym i wilgotnym nie stwierdzono suszy glebowej silnej w żadnym regionie w żadnym okresie. Nie stwierdzono w żadnym okresie i w żadnym regionie suszy glebowej ekstremalnej (*SMI* < – 5,0). Uzyskane wyniki potwierdzają znaną zależność, że w miarę zmniejszania się zdolności retencyjnych gleby i zapasów wody dostępnej dla roślin, wzrasta częstotliwość okresów suszy glebowej i zagrożenie jej ujemny-

mi skutkami. Świadczy to o prawidłowości przyjętych założeń metodycznych i procedur obliczeniowych.

Tabela 5. Częstotliwość (%) klas wskaźnika *SMI* w siedliskach trwałych użytków zielonych w latach 2013–2014
Table 5. Frequency (%) of *SMI* classes in permanent grasslands in 2013-2014

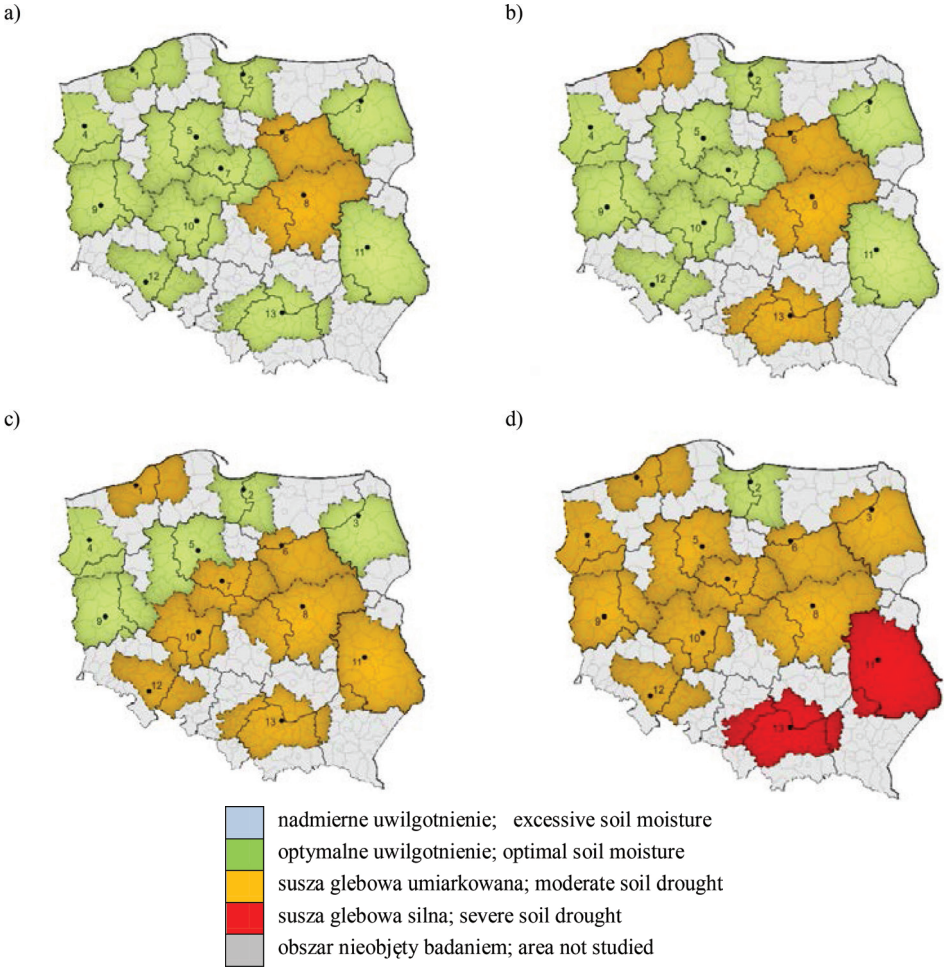
Nr regionu Region No.	Region	$SMI \geq 5$	$0 \leq SMI < 5$	$-2 \leq SMI < 0$	$-5 \leq SMI < -2$
Siedlisko mokre A Wet habitat A					
1	środkowopomorski	19	81	0	0
2	Żuławy	22	78	0	0
3	mazursko-podlaski	25	75	0	0
4	zachodniopomorski	25	75	0	0
5	bydgosko-toruński, środkowowielkopolski	22	78	0	0
6	północne Mazowsze	14	86	0	0
7	Kujawy	25	75	0	0
8	środkowomazowiecki	28	72	0	0
9	lubuski	22	78	0	0
10	południowowielkopolski	36	64	0	0
11	podlasko-poleski	33	61	6	0
12	dolnośląski	31	69	0	0
13	śląsko-krakowski	36	64	0	0
Siedlisko wilgotne B Moist habitat B					
1	środkowopomorski	14	86	0	0
2	Żuławy	22	67	11	0
3	mazursko-podlaski	25	75	0	0
4	zachodniopomorski	17	83	0	0
5	bydgosko-toruński, środkowowielkopolski	22	78	0	0
6	północne Mazowsze	11	83	6	0
7	Kujawy	25	72	3	0
8	środkowomazowiecki	25	64	11	0
9	lubuski	17	83	0	0
10	południowowielkopolski	25	69	6	0
11	podlasko-poleski	31	47	22	0
12	dolnośląski	28	72	0	0

Nr regionu Region No.	Region	$SMI \geq 5$	$0 \leq SMI < 5$	$-2 \leq SMI < 0$	$-5 \leq SMI < -2$
13	śląsko-krakowski	28	64	8	0
Siedlisko posuszne C Periodically dry habitat C					
1	środkowopomorski	11	67	22	0
2	Żuławy	14	61	22	3
3	mazursko-podlaski	25	58	17	0
4	zachodniopomorski	14	75	11	0
5	bydgosko-toruński, środkowowielkopolski	17	72	11	0
6	północne Mazowsze	11	50	36	3
7	Kujawy	25	42	33	0
8	środkowomazowiecki	22	56	19	3
9	lubuski	14	78	8	0
10	południowowielkopolski	19	69	11	1
11	podlasko-poleski	31	33	22	14
12	dolnośląski	25	61	14	0
13	śląsko-krakowski	25	64	6	5
Siedlisko suche D Dry habitat D					
1	środkowopomorski	8	47	33	12
2	Żuławy	11	47	19	23
3	mazursko-podlaski	11	50	28	11
4	zachodniopomorski	8	61	25	6
5	bydgosko-toruński, środkowowielkopolski	8	58	28	6
6	północne Mazowsze	6	33	39	22
7	Kujawy	19	33	28	20
8	środkowomazowiecki	17	50	17	16
9	lubuski	8	64	25	3
10	południowowielkopolski	12	61	19	8
11	podlasko-poleski	28	22	31	19
12	dolnośląski	25	47	25	3
13	śląsko-krakowski	25	56	8	11

źródło: opracowanie własne; source: own studies

Traktując łącznie obie klasy suszy glebowej (suszę umiarkowaną i silną), w siedliskach mokrym i wilgotnym najwięcej susz glebowych wystąpiło w rejonie Lublina (odpowiednio 6% i 22% okresów dekadowych). W siedliskach po-

susznym i suchym najwięcej susz wystąpiło w północnej części Mazowsza (39% i 61%). To zróżnicowanie przestrzenne występowania susz w różnych siedliskach związane jest z innym oddziaływaniem lokalnych warunków meteorologicznych i ich rozkładem w czasie w siedliskach użytków zielonych różniących się retencja wodą i intensywnością hydrologicznego zasilanie.



Rysunek 2. Ocena stanu uwilgotnienia gleby w okresie 01.08.2013-10.08.2013 w siedlisku: a) mokrym A, b) wilgotnym B, c) posusznym C, d) suchym D
Figure 2. Assessment of soil moisture in the period 01.08.2013-10.08.2013 in a habitat: a) wet A, b) moisture B, c) periodically dry D, d) dry D

Średnia częstotliwość w Polsce stanów optymalnego uwilgotnienia wynosiła 74% w siedlisku mokrym, 73% w wilgotnym, 60% w posusznym i 48% w suchym. Stany nadmiernego uwilgotnienia, szkodliwego dla roślin z powody niedostatecznego natlenienia gleby, występowały z częstotliwością odpowiednio w siedliskach: 26, 22, 19 i 14%. Średnio w Polsce silna susza glebowa nie wystąpiła w siedlisku mokrym i wilgotnym. W siedlisku posusznym susza o takiej intensywności wystąpiła w 1 dekadzie na 36 dekad, a w suchym – w 4 dekadach. Umiarkowana susza glebowa nie wystąpiła w żadnym regionie w siedlisku mokrym, natomiast pojawiała się już w siedlisku wilgotnym (średnio w 2 dekadach). W siedlisku posusznym częstotliwość takiej suszy wynosiła średnio w Polsce 18% (w 6 dekadach), a w siedlisku suchym – 25% (w 18 dekadach).

Przykład zobrazowania stanu wilgotności gleby na trwałych użytków zielonych w okresie 01.08.2013-10.08.2013 w badanych siedliskach w oparciu o wartości wskaźnika *SMI* przedstawiono na rysunku 2.

WNIOSKI

Zastosowana w pracy metodyka oceny warunków uwilgotnienia trwałych użytków zielonych w różnych siedliskach za pomocą wskaźnika uwilgotnienia gleby *SMI* i otrzymane wyniki potwierdziły fakt zależności wilgotności gleby od zdolności retencyjnych gleby i intensywności zasilania siedliska wodą gruntową.

1. W siedliskach mokrych i wilgotnych wilgotność gleby utrzymywała się najczęściej w zakresie optymalnego uwilgotnienia, a warunki meteorologiczne, głównie opady, w niewielkim stopniu wpływały na wartości wskaźnika *SMI*.
2. Siedliska posuszne, a zwłaszcza suche charakteryzowały się większym zróżnicowaniem uwilgotnienia gleb. Było to spowodowane mniejszą retencją wodną tych siedlisk i w związku z tym większym oddziaływaniem warunków meteorologicznych na aktualny stan uwilgotnienia gleby.
3. Wskaźnik uwilgotnienia gleby *SMI* należy uznać za obiektywny miernik stanu uwilgotnienia gleby. Umożliwia on porównanie warunków uwilgotnienia w glebach o różnych zdolnościach retencyjnych i obiektywną ocenę intensywności suszy glebowej oraz stanów nadmiernego uwilgotnienia. Szczególnie przydatny może być w operacyjnym monitoringu wilgotności gleby.
4. Wskaźnik uwilgotnienia gleby *SMI* może być wyznaczany na podstawie pomiarów lub modelowania matematycznego wilgotności gleby.

Wymieniony w artykule system monitoringu jest elementem działania 1.2 pt. „Monitoring, prognoza przebiegu i skutków oraz ocena ryzyka wystąpienia deficytu i nadmiaru wody

na obszarach wiejskich", realizowanego przez Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w ramach Programu Wieloletniego na lata 2011-2015 pt. „Standaryzacja i monitoring przedsięwzięć środowiskowych, techniki rolniczej i rozwiązań infrastrukturalnych na rzecz bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju rolnictwa i obszarów wiejskich", finansowanego przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

LITERATURA

Allen, R.G., Pereira, L.S, Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper. No. 56. pp. 300.

Alley, W. M. (1984). *The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions*. J. of Clim. and Appl. Meteo. Vol. 23 Issue 7, 1100-1109.

Bieńkiewicz, P., Roguski, W., Łabędzki, L. (1983). Wilgotność krytyczna dla traw w profilach gleb hydrogenicznych. Wiad. IMUZ t. 15 z. 1, 59-73.

Canarache, A., Dumitru, S. (2000). *Impact of soil/land properties on the effects of drought and on soil rating.* Proceedings of The Central and Eastern Workshop on Drought Mitigation. Budapest. 12-15 April 2000, 135-142.

Ciołkosz, A., Podlacha, K., Ostrowski, J. (2004). *Zastosowania teledetekcji i kartografii w badaniach obszarów wiejskich*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 4, Zesz. Nr. 2a (11), 157-173.

Dąbrowska-Zielińska, K., Budzyńska, M., Kowalik, W., Malek, I., Turlej, K., Bochenek, Z. (2010). *Soil moisture and evapotranspiration of wetlands vegetation habitats retrieved from satellite images*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2010, 7, 5929–5955.

Guttman, N.B. (1998). *Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index*. Jour. Amer. Water Resours. Assoc. Vol. 34 no. 1, 113-121.

Jaworski, J., Krupa-Marchlewska, J., Szkutnicki, J. (2002). *O zasobach i niedoborach wodnych we wschodniej części województwa mazowieckiego (na przykładzie zlewni Wilgi)*. Prz. Geof., t. XLVII, z. 3–4, 225–240.

Hunt, E.D., Hubbard, K.D., Wilhite, D.A., Arkebauer, T.M., Dutcher, A.L. (2008). The *development and evaluation of a soil moisture index*. International Journal of Climatology. http://www.hprcc.unl.edu/publications/files/SMI_Paper.pdf. DOI: 10.1002/joc.1749. (dostęp: 10.03.2014).

Kaca, E., Łabędzki, L., Chrzanowski, S., Czaplak, I., Kasperska-Wołowicz, W. (2003). *Gospodarowanie zapasami wody użytecznej gleb torfowo-murszowych w warunkach regulowanego odpływu w różnych regionach agroklimatycznych Polski*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie nr 9, ss. 118.

Łabędzki, L. (1997). *Potrzeby nawadniania użytków zielonych – uwarunkowania przyrodnicze i prognozowanie*. Rozpr. Habil. Falenty: IMUZ, ss. 121.

Łabędzki, L. (2006). *Susze rolnicze – zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie nr 17, ss. 107.

Łabędzki, L., Kanecka-Geszke, E., Bąk, B., Słowińska, S. (2011). *Estimating reference evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith method for climatic conditions of Poland.* W: L. Łabędzki (ed.). Evapotranspiration. ISBN 978-953-307-251-7. Wyd. InTech, Rijeka, 275-294.

Łabędzki, L., Bąk, B., Smarzyńska, K. (2014). *Spatio-temporal variability and trends of Penman-Monteith reference evapotranspiration (FAO-56) in 1971-2010 under climatic conditions of Poland.* Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 23. No. 6. 2083-2091. DOI: 10.15244/pjoes/27816.

Łabędzki, L., Bąk, B. (2013). *Monitoring i prognozowanie przebiegu i skutków deficytu wody na obszarach wiejskich*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 2/I/, 65–76.

Łabędzki, L., Kasperska, W. (1994). *Współczynniki roślinne do obliczania ewapotranspiracji łąk 3-kośnych w warunkach optymalnego uwilgotnienia gleby*. Wiad. IMUZ t. 18 z. 1, 119-125.

Maracchi, G., (2000). *Agricultural drought – a practical approach to definition, assessment and mitigation strategies*. Kluwer Academic Publishers, Natural Hazards 25, 247–252.

Palfai, I., Petrasovits, I., Vermes, L. (1995). *Some methodological questions of the European drought sensitivity map*. Proceedings of the ICID International Workshop on Drought in the Carpatians' Region, 3-5 May, Budapest, Hungary, 131-142.

Rocznik statystyczny rolnictwa. (2014). GŁÓWNY URZĄD STATYSTYCZNY. Roczniki branżowe. Warszawa 2014 ss.445. www.stat.gov.pl. (dostęp 2.03.2015).

Roguski, W., Łabędzki, L. (1988). *Wpływ plonu z poszczególnych odrostów na wielkość sezonowych współczynników roślinnych k stosowanych do obliczeń ewapotranspiracji rzeczywistej łąki*. Zesz. Nauk. ATR Bydgoszcz nr 158 Rolnictwo z. 27, 71-78.

Słota, H., Bobiński, E., Dobrowolski, A., Fal, B., Gałka, S., Korol, R., Lorenc, H., Mierkiewicz, M., Rutkowski, T., Tomaszewska, T., Żelaziński, J. (1992). *Susza 1992: Zakres, intensywność, przyczyny i skutki, wnioski*. Mater. Badawcze IMGW. Seria: Hydrologia i Oceanologia, Warszawa: IMGW.

Vermes, L. (1998). How *to work out a drought mitigation strategy. An ICID Guide. Guidelines for Water Management.* DVWK Bonn, pp. 29.

Prof. dr hab. inż. Leszek Łabędzki, Dr inż. Bogdan Bąk
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach
Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy
ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz
tel. 52 3750107
e-mail: l.labedzki@itp.edu.pl

Wpłynęło: 8.01.2015
Akceptowano do druku: 25.06.2015