INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 2/I/2013, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 155–165
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

WPŁYW PRZEWIDYWANEJ ZMIANY KLIMATU NA ZAPOTRZEBOWANIE ZIEMNIAKA PÓŹNEGO NA WODĘ

Leszek Łabędzki[1], Bogdan Bąk[1], Małgorzata Liszewska[2]
[1]Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy,
[2]Uniwersytet Warszawski

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WATER DEMAND OF LATE POTATO

Streszczenie

Praca zawiera analizę wpływu prognozowanej zmiany klimatu na zapotrzebowanie na wodę ziemniaka późnego w latach 2021–2050 oraz 2071–2100. Dane meteorologiczne zostały pozyskane z modelu regionalnego RM5.1, z warunkami brzegowymi z modelu globalnego ARPEGE dla scenariusza emisji SRES: A1B. Okresem referencyjnym były lata 1971–2000.

Miarą zapotrzebowania wody przez daną roślinę uprawną dla wydania określonego plonu jest ewapotranspiracja potencjalna tej rośliny. Obliczono ją przy użyciu metody Penmana-Monteitha i współczynników roślinnych. Wpływ zmian klimatu na ewapotranspirację potencjalną ziemniaka późnego na obszarze Polski oceniano na pięciu stacjach meteorologicznych, reprezentatywnych dla regionów agroklimatycznych: Olsztyn, Bydgoszcz, Warszawa, Wrocław, Kraków.

W wieloleciach 2021–2050 i 2071–2100 zwiększy się zapotrzebowanie na wodę w uprawie ziemniaka późnego. W wieloleciu 2021-2050 są spodziewane kilkuprocentowe wzrosty (do 7%), natomiast w latach 2071-2100 prognozowany wzrost będzie jeszcze większy (do 18%). Największy wzrost zapotrzebowania nastąpi w regionie południowo-zachodnim i środkowo-wschodnim, a najmniejszy w południu-wschodnim.

Przewidywane zmiany klimatyczne i związany z nimi wzrost zapotrzebowania na wodę przez rośliny, powinny spowodować zwiększenie powierzchni nawadnianej i wzrost zapotrzebowania na wodę do nawodnień.

Słowa kluczowe: zmiana klimatu, potrzeby wodne, ziemniak późny

Summary

The paper presents the analysis of the impact of predicted climate change on water demand of late potato in 2021–2050 and 2071–2100. Meteorological data were simulated with the regional model RM5.1 with boundary conditions from the global model ARPEGE for the scenario SRES: A1B. Reference period was 1971–2000.

The measure of crop water demand is potential evapotranspiration. It was calculated using the Penman-Monteith method and crop factors. The impact of climate change on potential evapotranspiration of late potato was evaluated in Poland at the five meteorological stations representative for agroclimatic regions: Olsztyn, Bydgoszcz, Warszawa, Wrocław, Kraków.

Water demand of late potato will increase of up to 7% in 2021-2050 and of up to 18% in 2071-2100. Increase will be the biggest in the south-west and central-east regions and the smallest in south-east region. Predicted climate change and increased crop water demand should result in increase of irrigated area and irrigation water requirements.

Key words: *climate change, water demands, late potato*

WSTĘP

Już obecnie, jak i w najbliższej przyszłości, polskie rolnictwo staje przed wyzwaniem wzrostu ryzyka produkcji spowodowanego zmianami klimatycznymi, objawiającymi się zmianami rozkładu opadów, temperatury, częstości pojawiania się ekstremalnych zjawisk pogodowych oraz ograniczeniami w dostępności zasobów wodnych i glebowych. Scenariusz najbardziej prawdopodobny (A2) przewiduje pod koniec wieku XXI wzrost temperatury globalnej o około 4°C [Alcamo i in. 2007, IPCC 2007, Randall i in. 2007]. W Polsce należy się spodziewać wzrostu temperatury o około 2-4°C.Większość scenariuszy dla Polski nie przewiduje wzrostu sumy opadów w ciągu roku. Można natomiast spodziewać się wzrostu opadów zimowych, a zmniejszenia opadów letnich [Alcamo i in. 2007, EEA 2008, IPCC 2007, Kundzewicz 2003, 2007, Parry 2000, Randall i in. 2007]. Spowoduje to nadmierne uwilgotnienia gleby w okresie wczesnowiosennym i potrzebę odprowadzenia tej wody przez systemy drenarskie oraz przesuszenie gleb w okresie letnim i potrzebę nawodnień [Döll 2002, Jaworski 2004, Olesen, Bindi 2002].

Przewidywany wzrost natężenia i częstotliwości susz może spowodować wzrost deficytów wody w rolnictwie. Susze stają się w ostatnich latach coraz bardziej dokuczliwe [Łabędzki 2006], a jednocześnie dopuszcza się do bardzo głębokiego kryzysu nawodnień w Polsce. W chwili obecnej nawodnienia odgrywają w kraju znikomą rolę zarówno w produkcji rolnej, jak i gospodarce wodnej. Możliwe zwiększenie deficytów wody w rolnictwie w wyniku zmian klimatu może utrwalić obecnie występujące trendy rozwoju nawodnień. Tymczasem znaczenie nawodnień w polskim rolnictwie powinno wzrastać wraz

z intensyfikacją rolnictwa i negatywnymi skutkami zmian klimatu [Łabędzki 2009].

W tym kontekście pojawia się pytanie, jak przewidywana zmiana klimatu w Polsce wpłynie na zapotrzebowanie na wodę w rolnictwie. W pracy zawarto analizę tego wpływu w odniesieniu do uprawy ziemniaka późnego w latach 2021–2050 oraz 2071–2100, na podstawie scenariusza zmian klimatu dla Polski SRES: A1B.

SCENARIUSZ ZMIANY KLIMATU

Zastosowany w pracy scenariusz zmian klimatu dla Polski jest oparty na symulacjach przeprowadzonych w projekcie UE ENSEMBLES (http://ensembles rt3.dmi.dk), wykonanych dla scenariusza emisji SRES: A1B. Należy on do rodziny scenariuszy SRES A1 i uwzględnia równowagę różnych źródeł energii. Przeprowadzone dla niego symulacje odzwierciedlają obraz średnich zmian w stosunku do scenariuszy skrajnych A2 i B1. Ostatnio odchodzi się od oszacowań na podstawie zbyt radykalnych scenariuszy. Przewidywane dane meteorologiczne pozyskuje się z różnych modeli globalnych i regionalnych. Te pierwsze symulują ewolucję parametrów klimatycznych w skali kuli ziemskiej i stanowią je numeryczne modele ogólnej cyrkulacji *GCMs* (ang. *General Circulation Models*). Do oszacowań regionalnych stosuje się dwie następujące grupy metod przejścia do skal mniejszych (ang. *downscaling*):

1. Empiryczno-statystyczne: wykorzystuje się związki empiryczne między zmiennymi wielkoskalowymi (predyktorami) a lokalnymi (predyktandami). Predyktory są określane na podstawie symulacji globalnych modeli klimatu. Zakłada się, że modele statystyczne opracowane dla przeszłości będą działały również w zmienionych warunkach klimatycznych, co stanowi poważne ograniczenie tych technik. Zwykle uwzględnia się jedynie część składowych głównych, co powoduje wyjaśnienie tylko części zmienności zawartej w predyktorach i predyktandach. Istnieje niebezpieczeństwo, że wyniki będą silnie uzależnione od wybranego predyktora czy predyktorów z modelu globalnego.
2. Dynamiczne: wykorzystuje się regionalne modele klimatyczne o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, rzędu 10-50 km, które pobierają warunki początkowe i brzegowe z globalnych projekcji klimatycznych. Modele regionalne, uwzględniając geograficzne szczegóły regionu (np. topografię, użytkowanie terenu), są w stanie opisać zjawiska klimatyczne (np. cyrkulację powietrza w skali regionalnej) związane z tymi szczegółami, które nie są symulowane przez modele ogólnej cyrkulacji pracujące w siatkach o znacznie większych oczkach. Zaletą podejścia dynamicznego jest spójność opisu fizycznego rozważanych procesów klimatycznych.

Ważne jest, aby przy wszystkich ocenach dotyczących ewentualnych przyszłych zmian klimatu brać pod uwagę różne możliwości rozwoju sytuacji

klimatycznej. Nie istnieje bowiem jeden sprawdzony scenariusz, zawsze trzeba rozważać wiązkę potencjalnych realizacji. Nie ma modelu doskonałego i dlatego konieczne jest wzięcie pod uwagę różnych modeli regionalnych zagnieżdżonych w różnych modelach globalnych. Jedynie w ten sposób można uwzględnić niepewności związane z samymi modelami, wynikające zwłaszcza z różnic w opisie fizyki zawartej w modelach.

Do prezentowanego opracowania dane meteorologiczne zostały pozyskane z modelu regionalnego RM5.1 z warunkami brzegowymi z modelu globalnego ARPEGE. Symulacje parametrów meteorologicznych przeprowadzono w siatce gridowej z 1274 węzłami, co dało rozdzielczość poziomą około 15 km.

METODY, ZAKRES BADAŃ I MATERIAŁ BADAWCZY

Przez zapotrzebowanie upraw rolniczych na wodę rozumie się ilość wody potrzebną do osiągnięcia określonego efektu produkcyjnego (uzyskania określonego plonu końcowego). Zapotrzebowanie na wodę zależy od właściwości danego gatunku roślin i wielkości plonu końcowego oraz od warunków meteorologicznych występujących w okresie wegetacji rośliny (przede wszystkim od wilgotności i temperatury powietrza, prędkości wiatru, energii promieniowania słonecznego).

Zapotrzebowanie roślin na wodę jest różne w poszczególnych fazach rozwojowych i zwiększa się wraz z przyrostem zielonej masy oraz rozwojem części wegetatywnych. Największe zapotrzebowanie zwykle przypada na okres krytyczny danej rośliny, czyli taki, w którym niedobór wody powoduje największe zahamowanie przyrostu i rozwoju.

Miarą zapotrzebowania wody przez daną roślinę uprawną dla wydania określonego plonu jest ewapotranspiracja potencjalna tej rośliny. Ewapotranspiracja potencjalna ET_p danej rośliny jest ewapotranspiracją rzeczywistą w warunkach dostatecznego zaopatrzenia roślin w wodę gleby. Zależy ona od fazy rozwojowej i masy nadziemnej roślin, czyli od powierzchni liści. Jest to ilość wody zużywana na wydanie określonego plonu przez rośliny w określonym stanie rozwoju, nawożone na określonym poziomie, w danych warunkach klimatyczno-glebowo-siedliskowych. Przyjmuje się, że warunki rozwoju roślin i zaopatrzenie w składniki pokarmowe są dobre.

Ewapotranspirację potencjalną ET_p obliczano metodą współczynników roślinnych jako:

$$ET_p = k_c ET_o \tag{1}$$

gdzie:

ET_o – ewapotranspiracja wskaźnikowa w okresie dekady, mm·dek^{-1};

k_c – współczynnik roślinny zależny od fazy rozwojowej rośliny i wielkości plonu.

Zalecaną metodą określania ewapotranspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha, w której stosuje się wzór [Allen i in. 1998, Łabędzki i in. 2011]:

$$ET_o = n\frac{0{,}408\Delta R_n + \gamma\frac{900}{T+273}u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0{,}34u)} \tag{2}$$

gdzie:

ET_o – ewapotranspiracja wskaźnikowa, mm·d^{-1};
R_n – promieniowanie netto, MJ·m^{-2}·d^{-1};
T – temperatura powietrza, ^{o}C;
u – prędkość wiatru na wysokości 2m, m·s^{-1};
Δ – nachylenie krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej, kPa·^{o}C^{-1};
γ – stała psychrometryczna, kPa·^{o}C^{-1};
e_a – ciśnienie pary wodnej, kPa;
e_s – ciśnienie pary wodnej nasyconej, kPa;
n – liczba dni w dekadzie.

Współczynnik roślinny k_c, wykorzystywany do obliczenia ewapotranspiracji potencjalnej roślin dających wysoki plon możliwy do osiągnięcia w warunkach wysokiego 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 rozwojowej rośliny i 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 (tab. 1), na podstawie danych literaturowych [Allen i in. 1998, Doorenbos, Kassam 1979, Doorenbos, Pruitt 1977, Łabędzki i in. 2008, Ostrowski i in. 2008, Roguski i in. 1988; Rojek 1987, 1990].

Do symulacji ewapotranspiracji potencjalnej zastosowano model matematyczny CROPBALANCE [Łabędzki 2006]. Symulacje przeprowadzono w każdym roku z krokiem czasowym jednej dekady kalendarzowej, w okresie kwiecień–październik.

Wpływ zmiany klimatu na potrzeby wodne ziemniaka późnego na obszarze Polski oceniano dla pięciu stacji meteorologicznych (Olsztyn, Bydgoszcz, Warszawa, Wrocław, Kraków), które są reprezentatywne dla regionów agroklimatycznych w Polsce (tab. 2).

Tabela 1. Współczynnik roślinny k_c do wzoru Penmana-Monteitha dla ziemniaka późnego
Table 1. Crop coefficient k_c for the Penman-Monteith equation for late potato

Miesiąc	Dekada	k_c
Kwiecień	1	0,20
	2	0,20
	3	0,20
Maj	1	0,40
	2	0,50
	3	0,60
Czerwiec	1	0,70
	2	0,80
	3	0,90
Lipiec	1	1,10
	2	1,10
	3	1,10
Sierpień	1	1,00
	2	0,90
	3	0,80
Wrzesień	1	0,70
	2	0,60
	3	0,50
Październik	1	0,20
	2	0,20
	3	0,20

Źródło: opracowanie własne na podst. Allen i in. [1998], Doorenbos i Kassam [1979], Doorenbos i Pruitt [1977], Łabędzki i in. [2008], Ostrowski i in. [2008], Roguski i in.[1988], Rojek [1987, 1990]

Tabela 2. Wybrane do opracowania stacje meteorologiczne i regiony agroklimatyczne w Polsce
Table 2. Chosen meteorological stations and agroclimatic regions in Poland

Region	Województwa	Reprezentatywna stacja meteorologiczna
Północno-wschodni	Podlaskie	Olsztyn
	Warmińsko-mazurskie	
	Pomorskie	
Środkowo-północno-zachodni	Zachodniopomorskie	Bydgoszcz
	Kujawsko-pomorskie	
	Łódzkie	
	Lubuskie	
	Wielkopolskie	
Środkowo-wschodni	Mazowieckie	Warszawa
	Świętokrzyskie	
	Lubelskie	
Południowo-zachodni	Dolnośląskie	Wrocław
	Opolskie	
	Śląskie	
Południowo-wschodni	Małopolskie	Kraków
	Podkarpackie	

Źródło: opracowanie własne

W węzłach siatki odpowiadających wybranym lokalizacjom, na podstawie symulowanych wartości temperatury powietrza modelem ARPEGE-RM5.1, obliczono rzeczywiste wartości średniej dekadowej temperatury powietrza w okresie kwiecień–październik w wieloleciu 1971–2000 oraz prognozowane wartości w latach 2021–2050 oraz 2071–2100. Ewapotranspirację wskaźnikową w latach 1971–2000, 2021–2050 oraz 2071–2100 obliczono stosując równania regresji liniowej między ewapotranspiracją wskaźnikową według Penmana-Monteitha (równanie (2)) i temperaturą powietrza, wyznaczone na podstawie pomierzonych wartości temperatury powietrza, ciśnienia pary wodnej w powietrzu, usłonecznienia i prędkości wiatru na analizowanych stacjach w latach 1970-2004 [Łabędzki i in. 2008].

Sumy dekadowe ewapotranspiracji potencjalnej obliczone z równania (1) zsumowano w każdym roku w okresie kwiecień–październik, a następnie obliczono średnie sumy w wieloleciach 1971-2100, 2021–2050 i 2071–2100. Wartości średnie z wieloleci były podstawą analizy i oceny wpływu zmiany klimatu na zapotrzebowanie na wodę ziemniaka późnego. Wielolecie 1971-2000 przyjęto jako okres referencyjny w stosunku do okresów 2021–2050 i 2071–2100.

WYNIKI I DYSKUSJA

W latach 1971-2000 największe potrzeby wodne ziemniaka późnego, mierzone ewapotranspiracją potencjalną, wystąpiły w regionie południowo-zachodnim reprezentowanym przez stację we Wrocławiu i wynosiły średnio 389 mm w okresie kwiecień-październik (tab. 3). Niewiele mniejsze (358 mm) zapotrzebowanie na wodę stwierdzono w regionie środkowo-północno-zachodnim, reprezentowanym przez stację w Bydgoszczy. Najmniejsze zużycie wody przez uprawę ziemniaka późnego w warunkach dostatecznego zaopatrzenia w wodę występowało w regionie południowo-wschodnim (stacja Kraków).

Z przeprowadzonych obliczeń dla prognozowanych warunków meteorologicznych w wieloleciach 2021–2050 i 2071–2100 wynika, że w tych okresach, na wszystkich wybranych stacjach w Polsce, zwiększy się zapotrzebowanie na wodę w uprawie ziemniaka późnego, wyrażone przez wzrost ewapotranspiracji potencjalnej ET_p (tab. 3). W wieloleciu 2021-2050 będą spodziewane tylko kilkuprocentowe wzrosty ET_p, wynoszące 8-30 mm. Największy wzrost (7%) może wystąpić w regionie południowo-zachodnim (Wrocław) i środkowo-wschodnim (Warszawa), a najmniejszy (3%) na południu Polski (Kraków). Natomiast w latach 2071-2100 prognozowany wzrost potrzeb wodnych ziemniaka późnego będzie większy. Pod koniec XXI wieku zapotrzebowanie na wodę przez uprawę ziemniaka późnego może być większe o 30-70 mm w całym okresie kwiecień-październik, w porównaniu z zapotrzebowaniem w ostatnim 30-leciu XX wieku. Największy wzrost (18%) jest spodziewany w uprawie ziemniaka późnego w Warszawie i we Wrocławiu, podobnie jak w wieloleciu 2021-2050.

Tabela 3. Zapotrzebowanie na wodę (mm) ziemniaka późnego w okresie kwiecień-październik, średnie w wieloleciach 1971-2000, 2021-2050, 2071-2100
Table 3. Water demand (mm) of late potato in the period April-October, mean in 1971-2000, 2021-2050, 2071-2100

Lata	Bydgoszcz	Wrocław	Kraków	Warszawa	Olsztyn
1971–2000	358	389	243	392	315
2021–2050	374	416	251	421	329
2071–2100	407	461	272	462	356
Zmiana					
(2021–2050)-(1971–2000)	16	27	8	29	14
(2071–2100)-(1971–2000)	49	72	29	70	41

Źródło: wyniki własne

Uzyskane wyniki są w dużym stopniu zbieżne z danymi podawanymi przez Jaworskiego [2004]. Autor ten przewiduje w Polsce pod koniec XXI wieku wzrost rocznej ewapotranspiracji różnych roślin uprawnych o 50-80 mm, stosując projekcję zmian klimatu według scenariusza GFDL i o 70-100 mm według scenariusza GISS. Raporty Europejskiej Agencji Środowiska [EEA 2008] i Międzyrządowego Panelu Zmiany Klimatu [IPCC 2007], jak również Olesen i Bindi [2002], przewidują w centralnej Europie wzrost zapotrzebowania na wodę ziemniaków o 6-10%.

Przedstawiony w pracy wzrost zapotrzebowania na wodę jest efektem tylko wzrostu temperatury powietrza. Nie uwzględniono prognozowanej zmiany innych elementów meteorologicznych, które również mają wpływ na ewapotranspirację, a więc przede wszystkim usłonecznienia i promieniowania słonecznego, jak również wilgotności powietrza i prędkości wiatru. Ponadto założono, że nie ulegnie zmianie charakter związku między temperaturą powietrza i ewapotranspiracją wskaźnikową. W pracy dokonano ekstrapolacji zależności wyprowadzonych dla wielolecia 1970-2004 i zastosowano je do obliczeń ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciach 2021-2050 i 2071-2100. Przyjęto również, że współczynnik roślinny k_c nie ulegnie zmianie. Brak jest przesłanek i badań wskazujących, że te zależności i parametry będą takie same w warunkach przyszłej zmiany klimatu.

Należy zwrócić uwagę jeszcze na inny aspekt wpływu zmiany klimatu na warunki wodne produkcji rolniczej. Prognozowany w pracy wzrost potrzeb wodnych ziemniaka w wyniku przewidywanego wzrostu temperatury powietrza w okresie letnim, w połączeniu z prognozowanym zmniejszeniem opadów w tym okresie i wydłużeniem sezonu wegetacyjnego, może spowodować zmniejszenie dostępnych zasobów wody w glebie, zwiększenie niedoborów wody dla roślin i w efekcie końcowym zmniejszenie rzeczywistego zużycia wody przez rośliny. Będzie to wywoływać szybki spadek wilgotności gleby w czasie sezonu wegetacji. Według modelu ECHAM5 przewiduje się zmniejszenie średnich rocznych wartości mobilnej retencji wodnej gleb o ok. 7% w ciągu

50 lat, a według modelu GFDL prognozowane zmiany mogą wynieść 15% [Somorowska 2008]. Świadczy to o możliwości nasilenia się występowania lat suchych, a w konsekwencji istotnego ograniczenia wody dostępnej dla roślin. Zmniejszenie rzeczywistego zużycia wody w uprawie ziemniaka późnego, spowodowane zmniejszeniem się zapasów wody w glebie, wyniesie pod koniec XXI wieku w Bydgoszczy i w Krakowie 11-12% [Łabędzki, Bąk 2012].

Przewidywane zmiany klimatyczne i związany z nimi wzrost zapotrzebowania na wodę przez rośliny oraz zmniejszenie dostępnych zasobów wody w glebie, powinny spowodować zwiększenie powierzchni nawadnianej i wzrost zapotrzebowania na wodę do nawodnień. Przewiduje się, że w południowowschodniej Anglii zapotrzebowanie wody do nawodnień netto wzrośnie o 70% w stosunku, a w północnych Niemczech – o 40% [Döll 2002]. Podobnego wzrostu można spodziewać się również na obszarze Polski. Zmiany klimatu wymuszają potrzebę modyfikacji technologii użytkowania wody na polu w kierunku oszczędności wody i zwiększania efektywności jej wykorzystania.

Przewiduje się jednak, że powierzchnia nawadniania i zużycie wody do nawodnień rolniczych w Polsce w przyszłości będzie zależeć od przyjętej strategii rozwoju rolnictwa i warunków ekonomicznych rolnictwa, a w mniejszym stopniu od uwarunkowań klimatycznych [Łabędzki 2009]. Możliwe zwiększenie deficytów wody w rolnictwie w wyniku zmian klimatu może zwiększyć obecne trendy rozwoju nawodnień. Znaczenie nawodnień w polskim rolnictwie powinno wzrastać wraz z intensyfikacją rolnictwa i negatywnymi skutkami zmian klimatu.

WNIOSKI

1. Na skutek przewidywanej zmiany klimatu w wieloleciach 2021–2050 i 2071–2100 zwiększy się zapotrzebowanie na wodę w uprawie ziemniaka późnego, wyrażone przez wzrost ewapotranspiracji potencjalnej.

2. W wieloleciu 2021-2050 są spodziewane kilkuprocentowe wzrosty (do 7%), natomiast w latach 2071-2100 prognozowany wzrost potrzeb wodnych ziemniaka późnego będzie jeszcze większy (do 18%). Pod koniec XXI wieku zapotrzebowanie na wodę przez uprawę ziemniaka późnego może być większe o 30-70 mm w całym okresie kwiecień-październik w porównaniu z zapotrzebowaniem w ostatnim 30-leciu XX wieku. Największy wzrost jest spodziewany w regionie południowo-zachodnim i środkowo-wschodnim, a najmniejszy w południu-wschodnim.

3. Przewidywane zmiany klimatyczne i związany z nimi wzrost zapotrzebowania na wodę przez rośliny oraz zmniejszenie dostępnych zasobów wody w glebie, powinny spowodować zwiększenie powierzchni nawadnianej i wzrost zapotrzebowania na wodę do nawodnień.

BIBLIOGRAFIA

Alcamo, J., J.M. Moreno J.M., Nováky B., Hindi M., Corobov R., Devoy R.J.N., Giannakopoulos C., Martin E., Olesn J.E., Shvidenko A. *Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007, s. 541-580.

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

Doorenbos J., Kassam A.H. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper. No. 33, 1979, 176 ss.

Doorenbos J., Pruitt W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper. No. 52, 1977, 156 ss.

Döll P. *Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective.* Climatic Change, 54, 2002, s. 269-293.

EEA. *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment.* Joint EEA-JRC-WHO report. Report No 4/2008, 2008.

IPCC. *The Fourth Assessment Report of the IPCC (AR4).* Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007.

Jaworski J. *Oddziaływanie przewidywanych zmian klimatu na parowanie terenowe i inne składniki obiegu wody w zlewni.* W: *Parowanie w cyklu hydrologicznym zlewni rzecznych.* Warszawa: Polskie Towarzystwo Geofizyczne, 2004, 422 ss.

Kundzewicz Z. *Scenariusze zmian klimatu.* W: *Czy Polsce grożą katastrofy klimatyczne?*. Komitet Prognoz „Polska 200 Plus", Polski Komitet Międzynarodowego Programu „Zmiany Globalne Geosfery i biofery" przy Prezydium PAN, Warszawa, 2003, s. 14-31.

Kundzewicz Z. *Projekcje zmian klimatu – ekstrema hydrometeorologiczne*. I Polska Konferencja ADAGIO, Poznań 24 kwietnia 2007.

Łabędzki L. *Susze rolnicze - zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji*. Woda Środowisko Obszary Wiejskie. Rozprawy Naukowe i Monografie, 17, 2006, 107 ss.

Łabędzki L. *Expected development of irrigation in Poland in the context of climate change.* Journal Water Land Develop., 13b, 2009, s. 17–29.

Łabędzki L., Bąk B. Opracowanie podstaw adaptacji polskiego rolnictwa wobec zmian klimatu. Etap II. Rolnicze zasoby wodne i ich użytkowanie dla przeciwdziałania skutkom zmiany klimatu w rolnictwie. Opracowanie wykonane dla Instytutu Ochrony Środowiska – Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie. Maszyn., 2012, 31 ss.

Łabędzki L., Bąk B., Kanecka-Geszke E., Kasperska-Wołowicz W., Smarzyńska K. Związek między suszą meteorologiczną i rolniczą w różnych regionach agroklimatycznych Polski. Woda Środowisko Obszary Wiejskie. Rozprawy Naukowe i Monografie, 25, 2008, 137 ss.

Łabędzki L., Kanecka-Geszke E., Bąk B., Słowińska S. Estimating reference evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith method for climatic conditions of Poland. W: Evapotranspiration. Pr. zbior. Red. L. Łabędzki. Rijeka. InTech., 2011, s. 275-294.

Olesen J.E., Bindi M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. Eur. J. Agron., 16, 2002, s. 239-262.

Ostrowski J., Łabędzki L., Kowalik W., Kanecka-Geszke E., Kasperska-Wołowicz W., Smarzyńska K., Tusiński E. *Atlas niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych w Polsce*. Falenty: Wydaw IMUZ, 2008, 19 ss. + 32 mapy.

Parry M.L. (ed.). *Assessment of potential effects and adaptation for climate change in Europe: The Europe ACACIA Project.* Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich United Kingdom, 2000, 324 ss.

Randall, D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. *Climate models and their evaluation.* W: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA. 2007.

Roguski W., Sarnacka S., Drupka S. *Instrukcja wyznaczania potrzeb i niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych.* Mater. Instr. nr 66. Falenty: IMUZ, 1988, 43 ss. + zał.

Rojek M. *Rozkład czasowy i przestrzenny klimatycznych i rolniczo-klimatycznych bilansów wodnych na terenie Polski*. Zesz. Nauk. AR Wroc., 62, 1987, 67 ss.

Rojek M. *Ocena ilościowa parowania terenowego wybranych roślin na podstawie współczynników roślinnych.* Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 390, 1990, s. 77-90.

Somorowska U. *Dynamika glebowych zasobów wodnych w Polsce współcześnie i w przyszłości.* Przeg. Geofiz., 2, 2008, s. 155–165.

Prof. dr hab. inż. Leszek Łabędzki
tel. 52 3750107
e-mail: l.labedzki@itp.edu.pl
Dr inż. Bogdan Bąk
tel. 52 3750107
e-mail: b.bak@itep.edu.pl

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach
Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy
ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz

Dr Małgorzata Liszewska
Uniwersytet Warszawski
Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego
ul. Pawińskiego 5a, 02-106 Warszawa
tel. 22 8749147
e-mail: m.liszewska@icm.edu.pl