INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr II/1/2015, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 319–334
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

DOI: http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2015.2.1.026

SYMULACJA WARUNKÓW HYDROTERMICZNYCH W PÓŁNOCNEJ CZĘŚCI CENTRALNEJ POLSKI W PERSPEKTYWIE LAT 2050-2060 DLA POTRZEB PRODUKCJI ROŚLINNEJ I WYBRANYCH SCENARIUSZY KLIMATYCZNYCH

Leszek Kuchar, Sławomir Iwański, Ewa Diakowska, Edward Gąsiorek
Uniwersytet Przyrodniczy we Wroclawiu

SIMULATION OF HYDROTHERMAL CONDITIONS FOR CROP PRODUCTION PURPOSE UNTIL 2050-2060 AND SELECTED CLIMATE CHANGE SCENARIOS FOR NORTH CENTRAL POLAND

Streszczenie

W pracy przedstawiono symulacje i ocenę zmian wskaźnika hydrotermicznego (HTC) Sieljaninowa w kontekście oczekiwanych zmian klimatu i potrzeb nawadniania roślin. Dla wybranej stacji meteorologicznej w centralnej Polsce wygenerowano dobowe wartości temperatur powietrza i opadów dla warunków aktualnych i oczekiwanych zgodnie z trzema typowymi dla Polski scenariuszami GISS Model E, HadCM3 i GFDL-R15, zakładającymi podwojenie koncentracji CO2 – co jest spodziewane w latach 2050-2060.

Dla czterech 500-letnich serii temperatur powietrza i opadów obliczono w okresach kroczących 30-dniowych wskaźnik hydrotermiczny HTC dla istotnych z punktu nawodnień okresów od kwietnia do września. Łącznie w każdym roku wyznaczono 154 wartości wskaźnika HTC. Przebieg wartości wskaźnika hydrotermicznego przedstawiono na wykresach dla wartości średnich, odchyleń standardowych, 99% obszarów krytycznych oraz empirycznych prawdopodobieństw wystąpienia okresów skrajnie suchych, bardzo suchych, suchych i dość suchych.

W badaniach wykazano zróżnicowane zmiany wskaźnika HTC a nawet jego pomniejszenie o 30% zależnie od rozpatrywanego scenariusza i okresu roku, przy jednoczesnym wzroście wariancji (z wyjątkiem scenariusza GISS) do 15%. Wyznaczone prawdopodobieństwa wystąpienia okresów skrajnie suchych (HTC<0.4) wskazują na wzrost średnio dwukrotnie, trzykrotnie i czterokrotnie odpowiednio dla scenariuszy GISS Model E, HadCM3 i GFDL-R15 w okresie czterech miesięcy od 120 do 240 dnia roku.

Słowa kluczowe: temperatury powietrza, opady, wskaźnik hydrotermiczny, zmiany klimatyczne, produkcja roślinna, generator danych meteorologicznych, centralna Polska

Summary

This paper attempts to evaluate expected climate changes for the purpose of irrigating plants using the hydrothermal index of Sieljaninov (HTC). Air temperature and total precipitation were simulated for conditions current and expected for a chosen meteorological station in Central Poland, according to the GISS Scenario, HadCM3 and GFDL (which is typical for Poland assuming the CO^2 concentration doubles, as is expected for the years 2050-2060). Four 500-year daily temperature and rainfall series were used for computing the hydrothermal index of Sieljaninov, with a 30-day window for irrigating periods, from April to September. The simulated hydrothermal index was presented on a graph during the vegetation period as a course of means, with critical area, standard deviations and probabilities of medium dry, dry, very dry and extremely dry periods.

The presented results show changes of average hydrothermal index (up to a 30 per cent drop) in considered periods and scenarios, as well as a 15 per cent variance increase (except GISS scenario). During the four critical months of the year, the estimated probability of extremely dry periods occurring (HTC<0.4) shows two, three and four times the risk of drought for the GISS Model E, HadCM3 and GFDL-R15 scenarios respectively.

Key words: *Temperature, Rainfall, Hydrothermal Coefficient, Climate Change, Crop Production Weather Generator, North Central Poland*

WSTĘP

W warunkach zachodzących zmian klimatycznych jedno z podstawowych pytań dotyczy oceny zagrożeń i możliwości adaptacyjnych w rolnictwie (Allen i in. 1998, Hunt i in. 2009, Kittel i in. 1998, Smith i Pitts 1997, Treder 2011,

Żarski 2011). Już wstępna analiza scenariuszy zmian klimatycznych dla Polski wskazuje na problem deficytu wód opadowych, co w świetle słabych możliwości retencyjnych może mieć poważne konsekwencje dla rolnictwa (Dzieżyc i Nowak 1993, Łabędzki 2009, Orlińska-Woźniak i in. 2013). Fakt ten może również wskazywać na konieczność nawadniania roślin w perspektywie 30-50 lat w różnym stopniu zależnie od regionu kraju. Zagrożenie suszami może być tym większe, że przewidywane temperatury według scenariuszy klimatycznych mają w różnej skali rosnąć (Boken i in. 2005, Doroszewski i in. 2012, Lloyd--Hughes, Miętus 2005, Narasimhan i Srinivasan 2005, Żarski i in. 2011). Jednak długi horyzont czasu dla oczekiwanych zmian daje możliwość kształtowania polityki adaptacyjnej oraz tworzenia wiedzy dla wspomagania decyzyjnego (Leśny 2009).

Zgodnie z różnymi scenariuszami zmian klimatu dla Europy środkowej kilkustopniowemu wzrostowi temperatury towarzyszyć będzie (w najlepszym wypadku) bardzo niewielki wzrost rocznych opadów wraz z ich redystrybucją w okresie roku – wzrostowi w okresie zimowym towarzyszyć będzie spadek w okresie letnim (IPCC 2007, IPCC 2013, Kuchar i Iwański 2011, Schmidt i in. 2006, Stouffer i in. 1994). W sytuacji wspomnianych wcześniej słabych możliwości retencyjnych i jednoczesnego wzrostu parowania należy oczekiwać, że w okresie wegetacji nastąpi zmniejszenie wody użytecznej dla roślin, przy prawdopodobnym szybkim wyczerpaniu zapasów pozimowych.

Jak wskazują autorzy prac (Boken i in. 2005, Kuchar i Bac, 2006) nie można także zapominać o efekcie rosnącej wariancji opadów i temperatur, które oznaczają częstsze pojawianie się sytuacji skrajnych, a więc także niekorzystnych w produkcji roślinnej.

Niniejsza praca jest kontynuacją wcześniej podjętych badań opartych na analizie serii opadowych symulowanych na lata 2050-2060 [Kuchar i Iwański 2011, 2013, Kuchar 2011]. Prace wzbogacone zostały o wyliczenia i analizę wskaźnika hydrotermicznego Sieljaninowa (HTC). Badania oparte zostały na symulowanych ciągach wartości dobowych opadów i temperatur powietrza generowanych dla warunków podwojenia koncentracji CO2 w atmosferze.

Do badań wybrano obszar centralnej Polski w rejonie Bydgoszczy jako szczególnie zagrożony przez susze, bowiem jak wynika z literatury w okresie, na przykład lat 1996-2005 na terenie tym, zależnie od gleby i gatunku roślin, wystąpiło od 8 do 16 posuch rolniczych (Dudek i in. 2009). W wymienionym okresie 25% posuch stanowiły posuchy intensywne (ciąg powyżej 20 dni braku wody łatwo dostępnej dla roślin), którym towarzyszyły nawet bardzo duże spadki plonów, zależnie od gleb i uprawianych gatunków roślin, dochodzące nawet do braku opłacalności produkcji (Koźmiński 1986, Łabędzki 2006, Szwejkowski i in. 2005, Żarski 2011).

MATERIAŁY I METODY

Badania przedstawione w niniejszej pracy, podobnie jak wcześniej (Kuchar i Iwański 2011, 2013) przeprowadzono wykorzystując posiadane dane klimatyczne dla miejscowości Toruń. Przyjęto też, że wybrana miejscowość ze względu na lokalizację, dobrze reprezentuje region północnej części centralnej Polski.

Symulację warunków hydrotermicznych w perspektywie do roku 2050-2060 przeprowadzono w oparciu o wskaźnik hydrotermiczny (HTC) Sieljaninowa (Sieljaninov 1966, Skowera i Puła 2004) dany w postaci:

$$HTC = \frac{10\sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i}$$

gdzie

n – długość rozważanego okresu w dniach;

P_i – wysokość opadów w i-tym dniu [mm];

t_i – średnia dobowa temperatura w i-tym dniu[°C];

(wskaźnik jest właściwie interpretowany, gdy t_i>10°C tj. dla średnich temperatur dobowych większych niż 10°C zgodnie ze skalą: stan skrajnie suchy (HTC≤0.4), bardzo suchy (0.4<HTC≤0.7), suchy (0.7<HTC≤1.0), dość suchy (1.0<HTC≤1.3) oraz optymalny (1.3<HTC≤1.6)).

W obliczeniach dla każdego roku wyznaczano 154 wartości wskaźnika HTC w ruchomych okresach 30-dniowych (n=30) od 1 kwietnia do 30 września obliczając w ten sposób wartości na koniec każdego 30 dniowego okresu (1 kwietnia do 30 kwietnia, 2 kwietnia do 1 maja, ….. 1 września do 30 września). Wybór do badań wskaźnika hydrotermicznego HTC podyktowany był jego prostą konstrukcją i interpretacją fizyczną, powszechnym dostępem do wartości temperatur i opadów wymaganych do jego wyznaczania, a także jego trafnością do opisu suszy (ADMS 2014, Bartoszek i Banasiewicz 2007, Łabędzki 2006, Łabędzki i Bąk 2014, Ziernicka-Wojtaszek 2012, Yakovleva 1979). Niniejszy wybór potwierdza też wiele badań w Polsce zgodnie z którymi dla okresów miesięcznych wskaźnik hydrotermiczny lepiej ilustruje warunki suszy w porównaniu do wskaźnika względnego opadu Kaczorowskiej RPI, wskaźnika standaryzowanego opadu SPI, oraz klimatycznego bilansu wodnego KBW (Ziernicka-Wojtaszek 2012). Uzasadnienie wyboru wskaźnika HTC do monitorowania suszy znaleźć można również w bogatej literaturze światowej, zwłaszcza dotyczącej susz w południowo-wschodniej Europie, gdzie oprócz lokalnie opracowanych lub adoptowanych wzorów jest powszechnie stosowany (Evarte-Bundere i Evarts-Bunders 2012, Monteva i in. 2010).

Do wyliczania wskaźnika hydrotermicznego (HTC) wykorzystano model generowania danych meteorologicznych WGENK (Kuchar 2004, 2005, Richardson 1985) oraz trzy scenariusze zmian klimatu – GISS Model E (Goddard

Institute for Space Studies), HadCM3 (Hadley Center) oraz GFDL-R15 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) (IPCC 2007, Kuchar 2005, Schmidt i in. 2006, www.giss.nasa.gov).

Zgodnie z wymogami modelu WGENK określono wartości miesięczne: dla temperatur minimalnych i maksymalnych, wariancje temperatur oraz sumy opadów wraz z wariancjami oraz liczby dni z opadem, prawdopodobieństwa warunkowe dni suchych pod warunkiem zaobserwowania dni mokrych oraz parametry α, β rozkładu prawdopodobieństwa gamma miesięcznych sum opadów.

Opisane wyżej elementy charakterystyki klimatycznej pozwoliły na wygenerowanie czterech 500-letnich serii dobowych danych opadów dla warunków aktualnych oraz przyszłych zgodnych ze scenariuszami zmian klimatu. Wspomniane scenariusze wybrano jako najbardziej realne z grupy scenariuszy umiarkowanych A_1B według Special Report on Emissions Scenarios

(SRES) a więc najbardziej prawdopodobnych dla warunków Polski. Warunki aktualne utworzono na datę roku 2000, natomiast warunki przyszłe dla lat 2050-2060 dla których zgodnie z wybranymi modelami oczekiwane jest podwojenie koncentracji dwutlenku węgla (IPCC 2007). Klasyczny wybór zgodny ze scenariuszami SRES podyktowany był znacznie większą wiedzą w zakresie wypracowanych procedur obliczeniowych w odróżnieniu do nowej filozofii opartej na bilansowaniu energii Ziemi zawartej w najnowszym opracowaniu IPCC z 2013 roku (IPCC 2013).

W badaniach posługiwano się ciągami danych generowanych zakładając, że zarówno w przypadku serii dla warunków aktualnych jak i oczekiwanych na datę podwojenia CO_2, błędy metody będą jednakowe lub bardzo podobne.

Dane utworzone dla sytuacji zakładającej zmiany klimatu (lata 2050-2060) wygenerowano wykorzystując zbiorczą informację o scenariuszach GISS, HadCM3 oraz GFDL (Tabela 1) i modyfikując aktualną charakterystykę klimatyczną (Kuchar 2005, Kuchar 2011).

Łącznie do niniejszych badań dla każdego scenariusza (GISS, HadCM3, GFDL i warunki aktualne) wygenerowano 2000 lat obserwacji (po 500 lat dla każdego scenariusza) dla których następnie wyznaczono 2000 ciągów po 154 wartości wskaźnika HTC (na każdy dzień roku w okresie od 30 kwietnia do 30 września).

WYNIKI

W tabeli 2 przedstawiono statystykę opisową wskaźnika hydrotermicznego (HTC) wyliczoną w oparciu o 500-letnie ciągi danych symulowanych dla średnich temperatur powietrza oraz sum opadów w kolejnych miesiącach okresu wegetacyjnego dla wybranych scenariuszy zmian klimatu oraz warunków aktualnych.

Tabela 1. Charakterystyka oczekiwanych zmian temperatur powietrza i opadów dla Europy Centralnej w perspektywie do roku 2050/2060 (2xCO2) wg scenariuszy GISS Model E, HadCM3 i GFDL-R15.
Table 1. Expected changes of air temperatures and rainfall for Central Europe until 2050-2060 (2xCO2) according to GISS Model E, HadCM3 and GFDL-R15 scenarios.

Model	Parametr i okres czasu Parameter and Time Period	Zmiana Change
GISS Model E	średnia average	
	– rok annual	+10 %
	– lato summer	0 %
	odchylenie std. standard deviation	
	– rok annual	+15 %
HadCM3	średnia average	
	– rok annual	+1 %
	– lato summer	– 9 %
	odchylenie std. standard deviation	
	– rok annual	+7 %
	– lato summer	+24 %
GFDL-R15	średnia average	
	– rok annual	0 %
	– lato summer	– 20 %
	odchylenie std. standard deviation	
	– rok annual	+20 %

Zdecydowanie więcej informacji wnoszą wykresy na rysunku 1 gdyż wyliczone wartości nie są związane sztywno z okresami miesięcznymi, chociaż są uwzględnione wśród wartości na wykresie (np. dzień=120 – kwiecień, itd.).

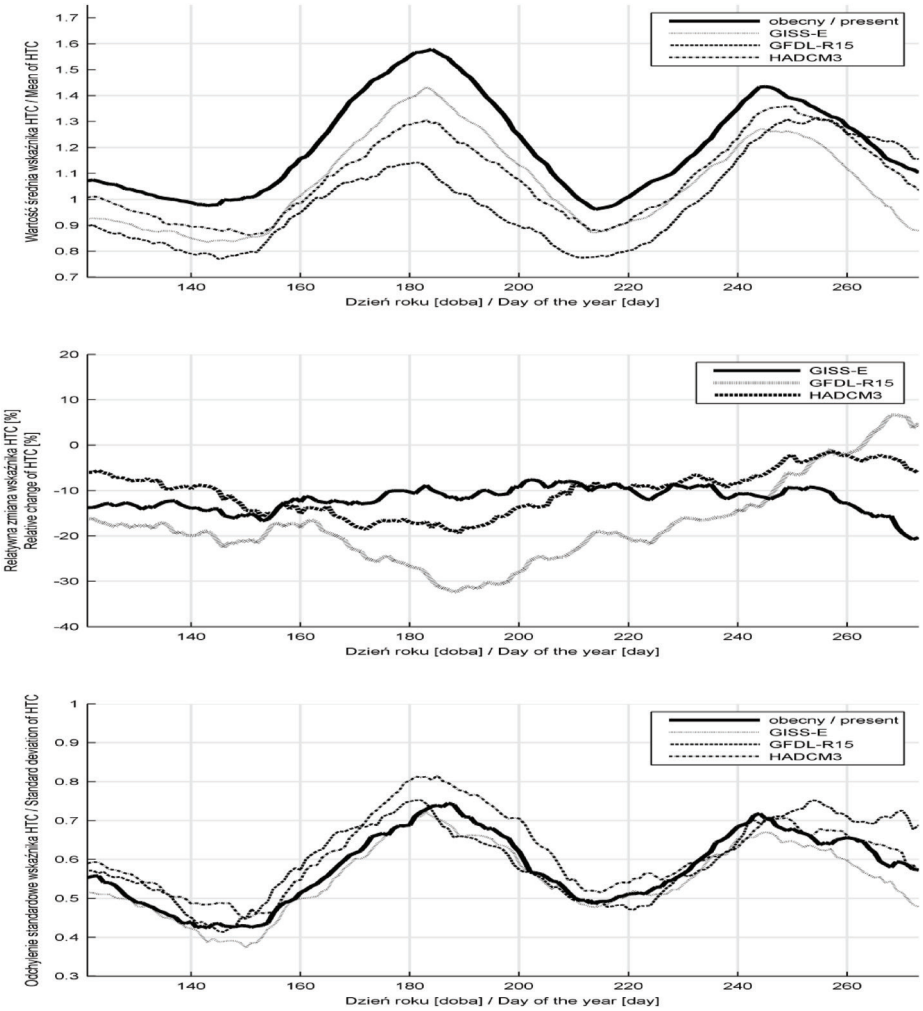
Analiza przebiegu średnich wartości wskaźnika hydrotermicznego wskazuje na znaczne zmniejszenie ich wartości dla wszystkich scenariuszy zmian klimatycznych w porównaniu z warunkami na rok 2000, praktycznie w całym rozważanym okresie (od 1 kwietnia do 30 września).

W szczególności odnotować należy pojawienie się długich okresów identyfikowanych jako suche, dla których wartości wskaźnika hydrotermicznego mieszczą się w przedziale $0.7<HTC\leq1.0$. W przypadku aktualnych warunków jedynie dwa krótkie okresy czasu z końcem maja i na przełomie lipca i sierpnia mają wartości nieznacznie mniejsze niż jeden ($HTC<1$). Dla każdego ze scenariuszy w pierwszej części roku dni takich jest nawet do ponad 40, natomiast w drugim półroczu najdłuższy okres to ponad 40-dniowy dla scenariusza GFDL. Scenariusz GFDL odznacza się też najgłębszymi spadkami. Znaczne spadki

wartości wskaźnika HTC w okresie maja nawet o 0.2 jednostki wskazują na pewne ryzyko susz w okresie krytycznym wzrostu roślin dla wszystkich trzech rozważanych scenariuszy.

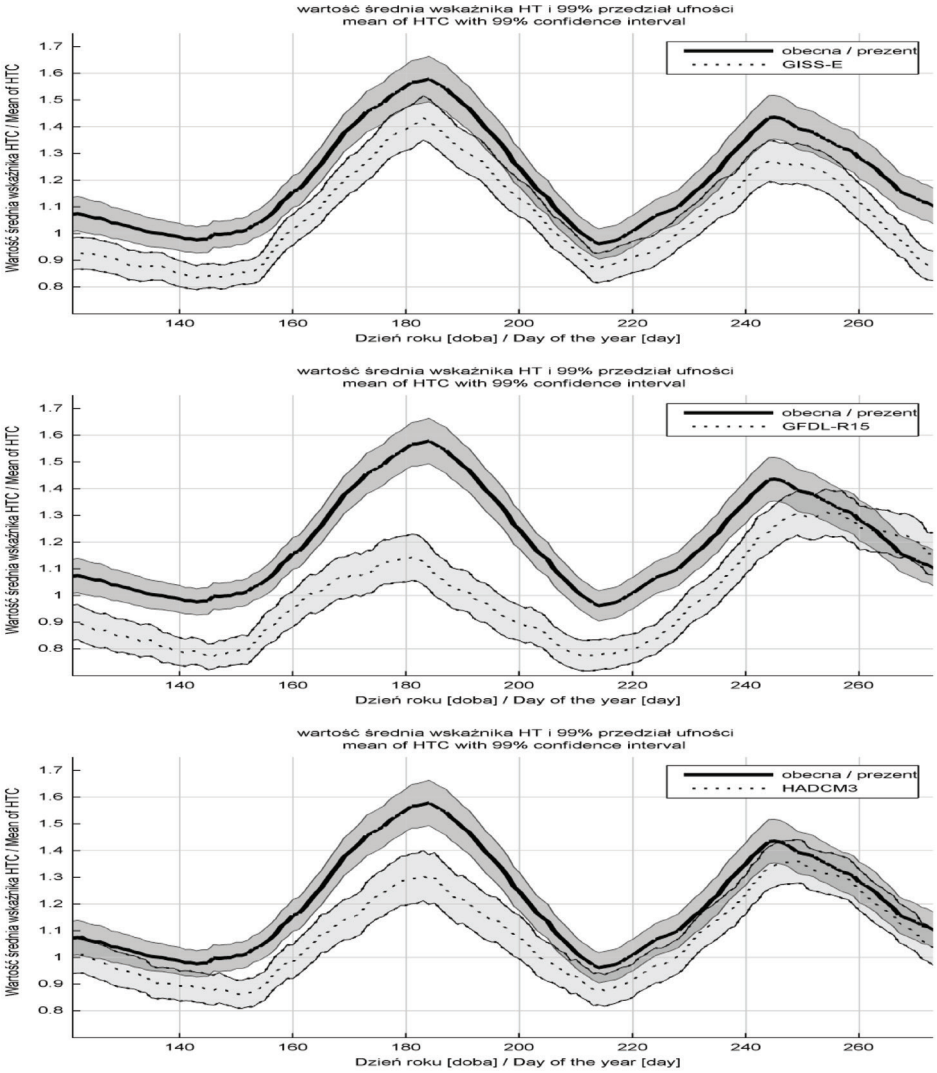
Tabela 2. Charakterystyka liczbowa wskaźnika hydrotermicznego (HTC) w różnych miesiącach okresu wegetacyjnego dla warunków aktualnych (2000) i lat 2050-2060 (wg scenariusza GISS Model E, HadCM3, GFDL).
Table 2. Descriptive statistics of hydrothermal coefficient (HTC) for different months within a vegetation period for present (2000) and future conditions (2050-2060) according to GISS Model E, HadCM3 and GFDL Scenario.

	Model Model	Wartość średnia Mean	Odch. standard. Std. deviation	Maksimum Maximum	Miniumum Minimum
IV	Obecny / present	1,1	0,56	3,3	0,02
	GISS-E	0,9	0,48	2,5	0,04
	GFDL-R15	0,9	0,58	3,5	0,00
	HADCM3	1,0	0,58	5,0	0,01
V	Obecny / present	1,0	0,42	2,6	0,18
	GISS-E	0,9	0,38	2,4	0,08
	GFDL-R15	0,8	0,47	3,1	0,07
	HADCM3	0,9	0,45	3,3	0,05
VI	Obecny / present	1,6	0,71	4,6	0,08
	GISS-E	1,4	0,7	3,8	0,16
	GFDL-R15	1,1	0,75	4,5	0,02
	HADCM3	1,3	0,81	5,1	0,02
VII	Obecny / present	1,0	0,49	3,0	0,07
	GISS-E	0,9	0,48	3,0	0,04
	GFDL-R15	0,8	0,49	4,1	0,06
	HADCM3	0,9	0,52	3,0	0,03
VIII	Obecny / present	1,4	0,71	4,5	0,01
	GISS-E	1,3	0,65	4,5	0,09
	GFDL-R15	1,2	0,7	4,7	0,04
	HADCM3	1,3	0,67	4,9	0,09
IX	Obecny / present	1,1	0,57	3,8	0,04
	GISS-E	0,9	0,48	2,9	0,01
	GFDL-R15	1,2	0,68	4,6	0,03
	HADCM3	1,0	0,57	3,3	0,01



Rysunek 1. Symulowane wartości wskaźnika hydrotermicznego (od góry): wartości średnie, zmiany w stosunku do warunków aktualnych, odchylenia standardowe dla przyszłych warunków (2050-2060, scenariusze GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3) na tle przebiegu warunków aktualnych (2000).

Figure 1. Simulation of hydrothermal coefficient values (from top to bottom): mean values, relative changes and standard deviations during the vegetation period May-September for present (2000) and future scenarios (2050-2060, GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3).



Rysunek 2. Średnie symulowane przebiegi wskaźnika hydrotermicznego z 99% obszarem ufności w okresie wegetacji dla przyszłych warunków (od góry), scenariuszy GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3) na tle średniego przebiegu warunków aktualnych (2000).

Figure 2. Simulation of mean course of hydrothermal coefficient with 99% confidence area during vegetation period for future climate scenarios GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3 (from top to bottom) and present conditions (2000).

Zmiany procentowe (rysunek 1 część środkowa) w jednoznaczny sposób ilustrują spadki wskaźnika hydrotermicznego w zasadniczej części sezonu wegetacyjnego o 10-20%. W przypadku scenariusza GFDL jest to nawet poziom 20-30%.

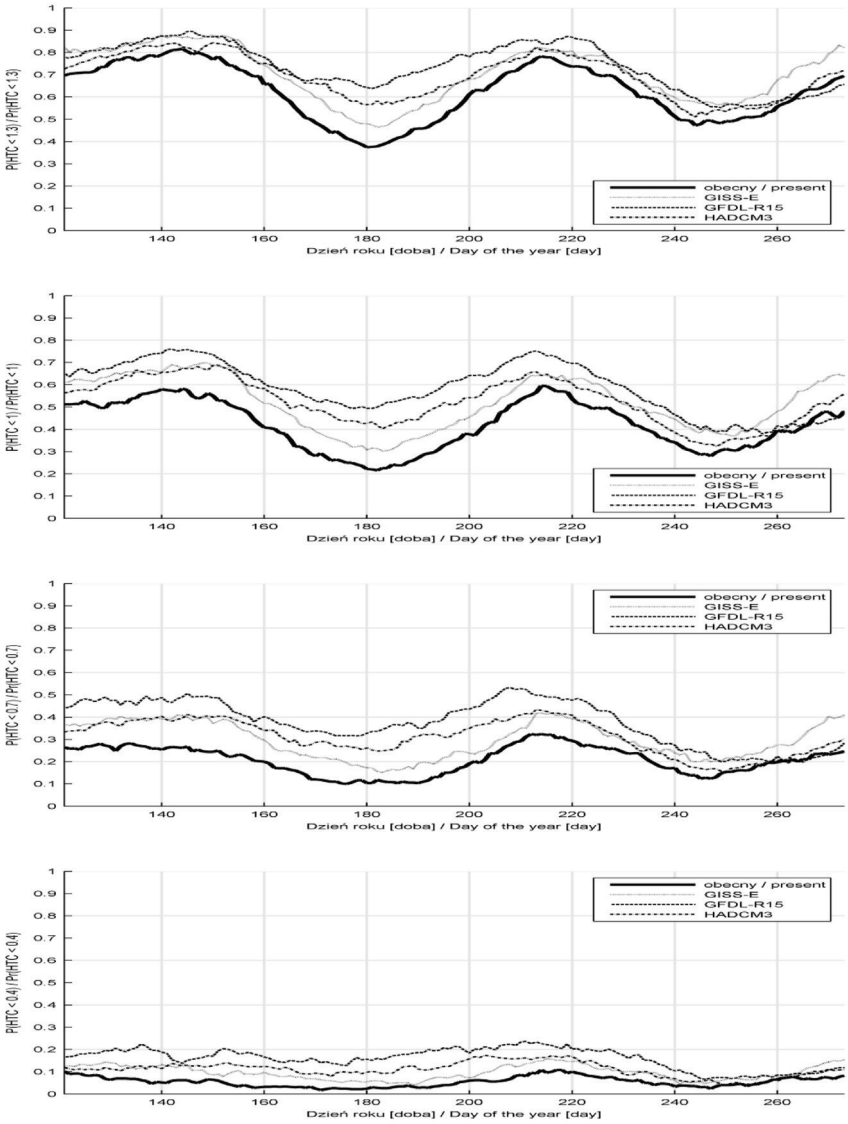
Pomimo, że wszystkie trzy scenariusze należą do grupy scenariuszy liberalnych A1B według kryteriów SRES to istnieje wyraźny ich zróżnicowanie – tak ze względu na wartości jak i dynamikę zmian. Odchylenie standardowe dla wartości współczynnika hydrotermicznego wykazuje wyraźną cykliczność (rysunek 1 część najniżej) mocno skorelowaną z wartościami średnimi. W szczególności niższym wartościom wskaźnika HTC towarzyszą niższe odchylenia standardowe, a wyższym wartościom wskaźnika większe wartości odchylenia standardowe. Wykresy odchyleń standardowych nie wykazują większych odchyleń pomiędzy warunkami aktualnymi a scenariuszem GISS, natomiast w przypadku scenariusza HADCM3 odchylenie standardowe w okresie do 230 dnia jest średnio wyższe o 10-15% (rys. 1) . W przypadku scenariusza GFDL odchylenie standardowe naprzemiennie jest większe lub mniejsze w stosunku do odchylenia standardowego warunków aktualnych, jednak w ważnym okresie dla wegetacji roślin (150-180 dzień roku) jest wyższe średnio o 10%.

Na rysunku 2 przedstawiono średnie symulowane przebiegi wskaźnika hydrotermicznego z 99% obszarem ufności w okresie wegetacji dla przyszłych warunków (od góry) tj. scenariuszy GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3). W każdym przypadku zamieszczono tło, którym jest pas ufności dla wartości średniej warunków aktualnych (2000). Obszary rozłączne na wykresach wskazują na istotne różnice wartości wskaźnika hydrotermicznego w stosunku do warunków aktualnych na poziomie istotności α=0.01.

Przedstawione wyniki uzupełniono wykresami prawdopodobieństw empirycznych (rys. 3) wystąpienia niższych wartości wskaźnikowych HTC niż 1.3, 1.0, 0.7, 0.4 to jest prawdopodobieństw Pr(HTC<1.3), Pr(HTC<1.0), Pr(HTC<0.7), Pr(HTC<0.4), (od góry) – czyli prawdopodobieństw wystąpienia okresów odpowiednio dość suchych, suchych, bardzo suchych oraz skrajnie suchych. Wykresy ilustrują zaistnienie opisanych warunków w okresie kwiecień--wrzesień dla przyszłych scenariuszy klimatycznych (GISS Model E, GFDL--R15, HadCM3) oraz warunków aktualnych (2000).

W niniejszych badaniach nie konstruowano rozkładów prawdopodobieństw wskaźnika HTC w związku z czym wyznaczono jedynie prawdopodobieństwa empiryczne korzystając z 500 obserwacji w każdym przypadku.

Do analizy przebiegu wskaźnika hydrotermicznego HTC zdefiniowano okresy czasu pokrywające miesiące w których potencjalnie stosuje się nawadnianie roślin. Z kolei wybór poziomu wskaźnika definiujący okresy jako dość suche, suche, bardzo suche oraz skrajnie suche umożliwiają ocenę zagrożenia wynikającego z oczekiwanych zmian klimatycznych w perspektywie do lat 2050-2060 tj. oczekiwanego podwojenia CO_2 w atmosferze.



Rysunek 3. Prawdopodobieństwa empiryczne wystąpienia niższych wartości wskaźnikowych HTC niż 1.3, 1.0, 0.7, 0.4 (od góry) w okresie kwiecień-wrzesień dla przyszłych warunków klimatycznych (scenariusze GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3) oraz warunków aktualnych (2000).

Figure 3. Empirical probabilities that hydrothermal coefficient HTC are lower than 1.3, 1.0, 0.7, 0.4 (from top to bottom, respectively) during the period April – September for climate change scenarios (GISS Model E, GFDL-R15, HadCM3 Scenarios) and present conditions (2000).

DYSKUSJA

Przedstawione symulacje opadów dla trzech scenariuszy zmian klimatu w perspektywie lat 2050-60 przeprowadzone dla północnej części centralnej Polski wskazują na zróżnicowane warunki zależnie od rozważanego modelu klimatycznego. W przypadku scenariusza GISS Model E, w stosunku do warunków aktualnych, oczekiwany jest stały w okresie wegetacji spadek wskaźnika hydrotermicznego średnio o 10%. Średnio blisko 60 dni można określić jako suche w stosunku do zaledwie kilku dla warunków aktualnych. W początkowym okresie wegetacji to jest kolejnych dni roku od 120 do 170 wartości wskaźników dla scenariusza GISS i warunków aktualnych różnią się istotnie na poziomie $\alpha=0.01$ (obszary rozłączne, rys. 2). Wariancja wskaźnika hydrotermicznego w okresie wegetacji dla scenariusza GISS praktycznie nie różni się w stosunku do warunków aktualnych. Znacznie bardziej istotne zmiany z punktu widzenia produkcji roślinnej wiązane są z realizacją scenariuszy GFDL-R15 i HadCM3. Spadki wartości wskaźnika HTC symulowane są w całym okresie wegetacji, nawet do wartości 70% wskaźnika obliczanego dla warunków aktualnych. Dla scenariusza GFDL-R15 prawie w całym okresie różnice są istotne w porównaniu do warunków aktualnych (rys. 2, obszary rozłączne),

natomiast w przypadku scenariusza HadCM3 istotne różnice notowane są w okresie 150-210 dnia roku (środkowy okres wegetacji). W przypadku obu scenariuszy w kluczowym okresie wegetacji wzrasta wariancja (wzrost na poziomie 15%) co wskazuje na dodatkowe zagrożenie okresami skrajnie suchymi ($HTC \leq 0.4$) oraz bardzo suchymi ($0.4 < HTC \leq 0.7$), którym mogą towarzyszyć znaczne deficyty wody użytecznej a dodatkowo większe potrzeby dla nawadniania roślin, szczególnie na lekkich glebach (Grabarczyk 1987, Rolbiecki i in. 2007, Żarski i Dudek 2003).

W całym okresie wegetacji następuje wzrost prawdopodobieństw wystąpienia okresów suchych, bardzo suchych oraz skrajnie suchych. Zmiany te nie są jednakowe w całym okresie. W przypadku okresów suchych ($0.7 < HTC \leq 1.0$) lub okresów suchych, bardzo suchych i skrajnie suchych prawdopodobieństwa $Pr(HTC \leq 1.0)$ wzrastają najbardziej pomiędzy 150 a 210 dniem roku. Bezwzględny wzrost wartości prawdopodobieństwa w zależności od zakładanego scenariusza wynosi od 50 do 250%. W przypadku pojawienia się okresów bardzo suchych lub skrajnie suchych prawdopodobieństwa $Pr(HTC \leq 0.7)$ znacznie rosną w całym rozważanym okresie, nawet 3-krotnie zależnie od okresu i rozważanego scenariusza. Największe zagrożenie dla rolnictwa związane jest z wystąpieniem okresów skrajnie suchych to jest prawdopodobieństwa $Pr(HTC \leq 0.4)$. Prawdopodobieństwo ryzyka wystąpienia okresów skrajnie suchych wzrasta średnio o 100% w przypadku scenariusza GISS Model E, 200% w przypadku scenariusza HadCM3 i 300% w przypadku scenariusza GFDL-R15 w okresie

czterech miesięcy od 120 do 240 dnia roku. Zwłaszcza okres w dalszej części wspomnianego przedziału czasu (140-200) jest szczególnie ważny, gdyż z dużym prawdopodobieństwem pozimowe zapasy wody zostały już wykorzystane (Kittel i in. 1998, Kuchar 2005). Tym samym realizacja w przyszłości scenariusza GFDL lub HadCM wskazuje na znaczny wzrost ryzyka suszy i posuch rolniczych oraz konieczność stosowania nawodnień.

Długa perspektywa dla oczekiwanych zmian klimatycznych może wskazywać na celowość podejmowania działań adaptacyjnych takich jak tworzenie i wykorzystanie zasobów wód otwartych dostępnych dla rolnictwa, przystosowanie technologii uprawy gleby dla zwiększenia retencji wody w glebie, nowe rejonizacje dla obszaru Polski, studia nad odmianami roślin mające na celu uzyskanie/dopasowanie do nowych warunków czy badania nad porównaniem klimatu (Leśny i in. 2009). W tych ostatnich celem byłoby pozyskiwanie informacji o uprawach w krajach, w których aktualne warunki odpowiadają przyszłym, oczekiwanym w Polsce.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania prowadzą do następujących wniosków:

1. Przewidywane zmiany warunków hydrotermicznych symulowane z krokiem dobowym dla okresów miesięcznych w czasie wegetacji roślin kwiecień-wrzesień w oparciu o trzy scenariusze zmian klimatu GISS Model E, HadCM3 oraz GFDL R14 na lata 2050-2060 dla północnej części centralnej Polski z wykorzystaniem wskaźnika hydrotermicznego Sieljaninowa, wskazują na dokonujące się zmiany. W zależności od rozważanego okresu oraz scenariusza klimatycznego najbardziej łagodne zmiany symulowane są w oparciu o scenariusz GISS – średnie obniżenie wartości wskaźnika o 10%, a największe do 30% dla scenariusza GFDL-R14. Zmianom wartości wskaźnika hydrotermicznego towarzyszy wzrost wariancji dla scenariuszy GFDL-R14 oraz HadCM3 zależny od okresu czasu – średnio na poziomie 15%. Zmiany te implikują rosnące zapotrzebowanie na nawadnianie roślin oraz wystąpienie większego ryzyka deficytu wody użytecznej dla roślin.
2. Prawdopodobieństwa ryzyka wystąpienia okresów skrajnie suchych wzrastają średnio dwukrotnie, trzykrotnie i czterokrotnie odpowiednio dla scenariuszy GISS Model E, HadCM3 i GFDL-R15 w okresie czterech miesięcy od 120 do 240 dnia roku. Dla badanych scenariuszy są to prawdopodobieństwa średnio rzędu 10-20 procent.

LITERATURA

ADMS. *Agricultural Drought Monitoring System in Poland,* http://www.susza.iung.pulawy.pl/, 2014.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998, s. 300.

Bartoszek K., Banasiewicz I. *Agrometeorologiczna charakterystyka okresu wegetacyjnego 2005 w rejonie Lublina na tle wielolecia 1951-2005,* Acta Agrophysica, 9(2), 2007, s. 275-283.

Boken V.K., Cracknell A.P., Heathcote R.L. (eds.). *Monitoring and predicting agricultural drought*, Oxford University Press, 2005, s. 472.

Doroszewski A., Jadczyszyn J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopatka A., Koza P., Górski T., Wróblewska E. *Podstawy systemu monitoringu suszy rolniczej,* Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 12(2)**,** 2012, s. 77-91.

Dudek S., Kuśmierek-Tomaszewska R., Żarski J. *Klasyfikacja okresów posusznych na podstawie bilansu wody łatwo dostępnej w glebie*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 3, 2009, s. 109–117.

Dzieżyc J., Nowak L. *Deszczowanie, Rozdział w pracy zbiorowej „Czynniki plonotwórcze plonowanie roślin" pod red. J. Dzieżyca,* PWN Warszawa-Wrocław, 1993, s. 329–352.

Evarte-Bundere G., Evarts-Bunders P. *Using of the hydrothermal coefficient (HTC) for interpretation of distribution of non-native tree species in Latvia on example of cultivated species of genus Tilia,* Acta Biol. Univ. Daugavp., 12(2), 2012, s. 135-148.

Grabarczyk S. *Efekty, potrzeby i możliwości nawodnień deszczownianych w różnych regionach Kraju,* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 314, 1987, s. 49–64.

Hunt E.D., Hubbard K.D., Wilhite D.A., Arkebauer T.M., Dutcher A.L. *The development and evaluation of a soil moisture index*, Int. J. Climatol., 29, 2009, s. 747–759.

IPCC *Fourth Assessment Report: Climate Change,* 2007 (AR4).

IPCC *Fifth Assessment Report: Climate Change,* 2013 (AR5).

Kittel T.G.F., Rosenbloom N.A., Painter T.H., Schimel D.S., Fisher H.H., Grimsdell A., Daly C., Hunt E.R. Jr. *The VEMAP Phase I Database: An Integrated Input Dataset for Ecosystem and Vegetation Modeling for the Conterminous United States,* Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. (VEMAP 1: U.S. Climate Change Scenarios Based on Models with Increased CO2) 1998.

Koźmiński Cz. *Przestrzenny i czasowy rozkład okresów bezopadowych trwających ponad 15 dni na terenie Polski*, ZPPNR, z. 268, PWN Warszawa, 1986, s. 17–36.

Kuchar L. *Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes*, Mathematics and Computer in Simulation, 65, 2004, s. 69-75.

Kuchar L. *Zmodyfikowany model WGENK generowania dobowych danych meteorologicznych na potrzeby modelowania agrometeorologicznego*, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 5, 2005, s. 185-195.

Kuchar L. *Weather Generation with a New Approach to Rainfall Variance Estimation and Seasonal Correlation of Variables for Crop Production*, Agrofizika, 4, 2011, s. 40-46.

Kuchar L., Bac S. *Szacowanie parowania potencjalnego w okresie zimowym za pomocą zmodyfikowanego wzoru Turca dla potrzeb modelowania hydrologicznego*, [w:] Kotecki A. (red.) Aktualne problemy rolnictwa, gospodarki żywnościowej i ochronie środowiska red, Wyd. AR Wrocław, 2006, s. 205-213.

Kuchar L., Iwański S. *Symulacja opadów atmosferycznych dla oceny potrzeb nawodnień roślin w perspektywie oczekiwanych zmian klimatycznych*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 5, 2011, s. 7–18.

Kuchar L., Iwański S. *Ocena opadów atmosferycznych dla potrzeb produkcji roślinnej w perspektywie lat 2050-2060 i wybranych scenariuszy zmian klimatu w północno-centralnej Polsce,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, *2, 2013, s. 187-200.*

Leśny J. (red.). *Climate change and agriculture in Poland – impacts, mitigation and adaptation measures*. Acta Agrophysica, 169, 2009, s.152.

Lloyd-Hughes B., Saunders M.A. *A drought climatology for Europe,* Int. J. Climatol., 22, 2002, s. 1571-1592.

Łabędzki L. *Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji*, Wyd. IMUZ, Falenty, 2006, s. 3–107.

Łabędzki L. *Przewidywane zmiany klimatyczne a rozwój nawodnień w Polsce*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 3, 2009, s. 1-18.

Łabędzki L., Bąk B. *Meteorological and agricultural drought indices used in drought monitoring in Poland: a review.* Meteorol. Hydrol. Water Managem., 2, 2014, s. 3-13.

Miętus M. *Ekstremalne zjawiska klimatyczne z perspektywy IPCC* [w:] Bogdanowicz E., Kossowska-Cezak U., Szkutnicki J., (red.) Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne, Wyd. PTGF IMGW, Warszawa, 2005, s. 19-31.

Monteva M., Kazandjiev V., Georgijeva V. *Climate Change and the hydrothermal and evapotranspiration conditions in the planning regions of Bulgaria*, Fourteenth Int. Water Techn. Conf. IWTC 14, Cairo, Egypt, 2010, s. 3-14.

The NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) at Columbia University in New York City http://www.giss.nasa.gov/.

Narasimhan B., Srinivasan R. *Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring*, Agric. For. Meteorol. 133, 2005, s. 69-88.

Orlińska-Woźniak P., Wilk P., Gębala J. *Water availability in reference to water needs in Poland.* Meteorol. Hydrol. Water Managem., 1, 2013, s. 45-50.

Richardson C.W. *Weather simulation for crop management models*, Trans. of the ASAE, 28, 1985, s. 1602–1606.

Rolbiecki S., Długosz J., Orzechowski M., Smólczyński S. *Uwarunkowania glebowo-klimatyczne nawodnień w Kruszynie Krajeńskim koło Bydgoszczy,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2, 2007, s. 89–102.

Schmidt G.A., Ruedy R., Hansen J.E., Aleinov I., Bell N., Bauer M., Bauer S., Cairns B., Canuto V., Cheng Y., Del Genio A., Faluvegi G., Friend A.D., Hall T.M., Hu Y., Kelley M., Kiang N.Y., Koch D., Lacis A.A., Lerner J., Lo K.K., Miller R.L.,

Nazarenko L., Oinas V., Perlwitz Ja., Perlwitz Ju., Rind D., Romanou A., Russell G.L., Sato Mki., Shindell D.T., Stone P.H., Sun S., Tausnev N., Thresher D., Yao M.-S. *Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data,* J. Climate, 19, 2006, s. 153-192.

Sieljaninov G.T. *Agroclimatic Map of the World*, Gidrometizdat, 1966, Leningrad.

Skowera B., Puła J. *Skrajne warunki pluwiotermiczne w okresie wiosennym na obszarze Polski w latach 1971-2000*, Acta Agrophysica, 3(1), 2004, s. 171-177.

Smith J.B., Pitts G.J. *Regional climate change scenarios for vulnerability and adaptation assessments,* Climatic Change, 36(1-2), 1997, s. 3-21.

Stouffer R.J., Manabe S., Vinnikov K.Ya. *Model assessment of the role of natural variability in recent global warming*, Nature, 367, 1994, s. 634-636.

Szwejkowski Z., Dragańska E., Banaszkiewicz B. *Niedobory i nadmiary opadów w okresie wegetacji ziemniaka późnego i buraka cukrowego w Polsce północno-wschodniej, w wieloleciu 1971–2000,* Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 5(14), 2005, s. 315–326.

Treder W., *Ocena przestrzennej zmienności występowania opadów w Polsce centralnej w sezonie wegetacyjnym roku 2010,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 5, 2011, s. 29-37.

Yakovleva N.I. *A comparison between different aridity indices*. Proceedings of the Main Geophysical Observatory (*GGO*), 403, 1979, s. 3-13

Ziernicka-Wojtaszek A. *Porównanie wybranych wskaźników oceny suszy atmosferycznej na obszarze województwa podkarpackiego (1901-2000),* Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 12(2), 2012, s. 365–376.

Żarski J. *Tendencje zmian klimatycznych wskaźników potrzeb nawadniania roślin w rejonie Bydgoszczy,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 5, 2011, s. 29-37.

Żarski J., Dudek S. *Rola deszczowania w kształtowaniu plonowania wybranych upraw polowych*, Pamiętnik Puławski, 132, 2003, s. 443–449.

Żarski J., Treder W., Dudek S., Kuśmierek-Tomaszewska R. *Ustalanie terminów nawadniania na podstawie prostych pomiarów meteorologicznych,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 6, 2011, s. 101-108.

Prof. dr hab. Leszek Kuchar
Dr Sławomir Iwański
Dr Edward Gąsiorek
Mgr Ewa Diakowska – stażystka
Katedra Matematyki
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Ul. Grunwaldzka 53
50-357 Wrocław
Leszek.Kuchar@gmail.com

Wpłynęło: 10.01.2015
Akceptowano do druku: 17.04.2015