INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 5/2011, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 7–18
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Leszek Kuchar, Sławomir Iwański

SYMULACJA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH DLA OCENY POTRZEB NAWODNIEŃ ROŚLIN W PERSPEKTYWIE OCZEKIWANYCH ZMIAN KLIMATYCZNYCH

RAINFALL SIMULATION FOR THE PREDICTION OF CROP IRRIGATION IN FUTURE CLIMATE

Streszczenie

W pracy podjęto próbę oceny zmian opadów atmosferycznych dla potrzeb nawadniania roślin w kontekście oczekiwanych zmian klimatu. Dla wybranej stacji meteorologicznej w centralnej Polsce symulowano opady dla warunków aktualnych i oczekiwanych zgodnie z typowym dla Polski scenariuszem GISS Model E, zakładającym podwojenie koncentracji CO_2 - co jest spodziewane w latach 2050-2060.

Dwie 300-letnie serie opadowe porównywano między sobą analizując kluczowy dla nawodnień okres od maja do września. Dla symulowanych danych przedstawiono rozkłady prawdopodobieństwa sum opadów w badanych okresach, charakterystyki liczbowe zmiennych losowych oraz kwantyle rozkładów prawdopodobieństwa. Wykazano nieznaczny wzrost średnich sum opadów (do 6 procent) w rozważanych okresach i znacznie większy wzrost wariancji (nawet do 30 procent). W kontekście nawodnień oznacza to większe ryzyko susz i konieczność zapewnienia pokrycia wymagań wodnych roślin w okresach krytycznych. Wyniki wskazują na konieczność zastosowania modelu kompleksowego uwzględniającego *en bloc* zmienne meteorologiczne.

Słowa kluczowe: nawadnianie, zmiany klimatu, scenariusz GISS model E, generowania danych meteorologicznych

Summary

This paper attempts to evaluate rainfall in the context of expected climate changes for the purpose of irrigating plants. For a chosen meteorological station in Central Poland total precipitation was being simulated for conditions current and expected, according to GISS Scenario (GISS Scenario as typical for Poland assumes doubling the CO2 concentration as expected for years 2050-2060). Two 300-year daily rainfall series were compared to analyse periods for crucial irrigating starting in May and ending in September. For the simulated data probability density function of total rainfall were estimated in examined periods and subsequently used for tail area approximation.

The results present a slight increase in the average sums of rainfall (up to 5 per cent) in considered periods, as well as much greater height variance (as much as 20 per cent). In the context of irrigation, this means a greater risk of drought and a need for providing water requirements for plants in critical periods.

The results suggest a need to use a comprehensive model taking en bloc meteorological variables into account.

Key words: Irrigation, Climate Change, GISS Model E, Weather Generator

WSTĘP

Zmiany klimatyczne niosą ze sobą wiele niewiadomych. W szczególności wiele pytań dotyczy zagrożeń jakie mogą mieć miejsce w rolnictwie oraz możliwości adaptacyjnych [Budzyński i Krasowicz 2008; Smith i Pitts 1997; Kittel i in. 1998]. W tym kontekście bardzo ciekawy staje się problem nawadniania roślin [Dzieżyc 1988; Lamm i Trooien 2003; Łabędzki 2009]. Chociaż dzisiaj nawodnienia w Polsce stosuje się w bardzo ograniczonym zakresie, to oczekiwane zmiany klimatu w perspektywie 30-50 lat skłaniają do rozważań co do ich przyszłości [Dzieżyc i Nowak 1993; Howell i in. 1997; Mazurczyk i in. 2004; Żarski i Dudek 2003]. Długi horyzont dla oczekiwanych zmian pozwala również na spokojne podjęcie ewentualnych decyzji i konsekwentną ich realizację.

Z ogólnych informacji o oczekiwanych zmianach klimatycznych wynika bowiem, że kilkustopniowemu wzrostowi temperatury towarzyszyć będzie jedynie nieznaczny wzrost rocznych opadów z ich dominującym wzrostem w okresie zimowym [Schmidt i in. 2006]. Tym samym w okresie wegetacji należy oczekiwać spadku ilości wody użytecznej dla roślin, przy prawdopodobnym szybkim wyczerpaniu zapasów pozimowych na wskutek zwiększonego parowania. Do wspomnianych warunków dochodzi dodatkowo efekt zwiększonej wariancji procesów, który oznacza częstsze pojawianie się sytuacji skrajnych, a więc niekorzystnych dla produkcji roślinnej. W efekcie o przyszłości nawodnień zadecyduje bilans ekonomiczny, którego istotną składową będzie koszt związany z uzupełnieniem wody do wartości optymalnej dla produkcji [Grabarczyk 1987].

Celem niniejszej pracy jest próba wskazania potencjalnej roli nawadniania roślin w nowych warunkach klimatycznych, jak również określenia znaczenia dla strategii rozwoju rolnictwa i wspomagania decyzyjnego [Drupka i in. 2001].

Dla przeprowadzenia badań wybrano obszar centralnej Polski w rejonie Bydgoszczy, jako szczególnie zagrożony brakiem opadów atmosferycznych. W okresie ostatnich lat 1996-2005 na obszarze tym, zależnie od gleby i gatunku roślin, wystąpiło od 8 do 16 posuch rolniczych [Dudek i in. 2009]. Autorzy wskazują na wielką rolę posuch w rolnictwie definiując je w zależności od czasu trwania jako umiarkowane (ciąg 7-13 dni braku wody łatwo dostępnej dla roślin), intensywne (ciąg 14-20 dni) oraz bardzo intensywne (ciąg powyżej 20 dni). W cytowanym okresie 25% posuch stanowiły posuchy intensywne. W obszarze tym spadki plonów mogą być bardzo duże, zależnie od gleb i uprawianych gatunków roślin, dochodząc nawet do granicy opłacalności produkcji [Koźmiński 1986; Łabędzki 2006; Szwejkowski i in. 2005; Żarski 1992].

MATERIAŁY I METODY

Badania przeprowadzono wykorzystując posiadane dane klimatyczne dla miejscowości Toruń. Ponad to, istniejące w internecie bogate dane meteorologiczne dla Torunia pozwoliły na uzupełnienie brakujących informacji i oszacowanie wymaganych parametrów. Przyjęto też, że wybrana miejscowość ze względu na lokalizację, dobrze reprezentuje region północnej części centralnej Polski.

Przy określaniu tak zwanej charakterystyki klimatycznej, niezbędnej do generowania danych syntetycznych – ze względu na charakter badań - ograniczono się do opadów [Kuchar 2004; Richardson 1985]. Zgodnie z wymogami wykorzystywanego modelu WGENK określono wartości miesięczne: sumy opadów, ich wariancje, liczby dni z opadem, prawdopodobieństwa 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 dwóch 300-letnich serii rocznych danych opadów dobowych dla warunków aktualnych oraz przyszłych, zgodnych ze scenariuszem zmian klimatu GISS. Warunki aktualne utworzono na datę roku 2000, natomiast warunki przyszłe dla lat 2050-2060, dla których zgodnie z modelem GISS Model E [NASA http://www.giss.nasa.gov, Schmidt i in. 2006] oczekiwane jest podwojenie koncentracji dwutlenku węgla w powietrzu atmosferycznym. 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. Dane utworzone dla sytuacji zakładającej zmiany klimatu (lata 2050-2060) wygenerowano, wykorzystując zbiorczą informację o scenariuszu GISS Model E (tabela 1) i modyfikując aktualną charakterystykę klimatyczną [Kuchar 2004].

Tabela 1. Charakterystyka zmian klimatu wg scenariusza GISS Model E (Europa Centralna, 2xCO_2)
Table 1. Summary climatology for CO_2 coupling according to GISS Model E Scenario, Central Europe

Model	Temperatura Temperature Parametr i okres czasu Zmiana Parameter and Time Period Change		Opady Total Rainfall Parametr i okres czasu Zmiana Parameter and Time Period Change	
GISS (Model E)	średnia average - rok annual - zima winter - lato summer odchylenie std. standard deviation - rok annual	 +2.8 °C +3.2 °C +2.0 °C +12 %	średnia average - rok annual - zima winter - lato summer odchylenie std. standard deviation - rok annual	 +10 % +15 % 0 % +15 %

Serie 300-letnich rocznych danych opadów wygenerowano przy użyciu modelu WGENK.

Model ten składa się z dwóch bloków: wodnego i energetyczno-cieplnego.

W bloku wodnym, przy użyciu łańcuchów Markowa pierwszego rzędu, określa się stan aktualnego dnia (dzień z opadem / bez opadu) i generuje wielkości opadów przy użyciu dwuparametrycznego rozkładu gamma $\Gamma(\alpha,\beta)$.

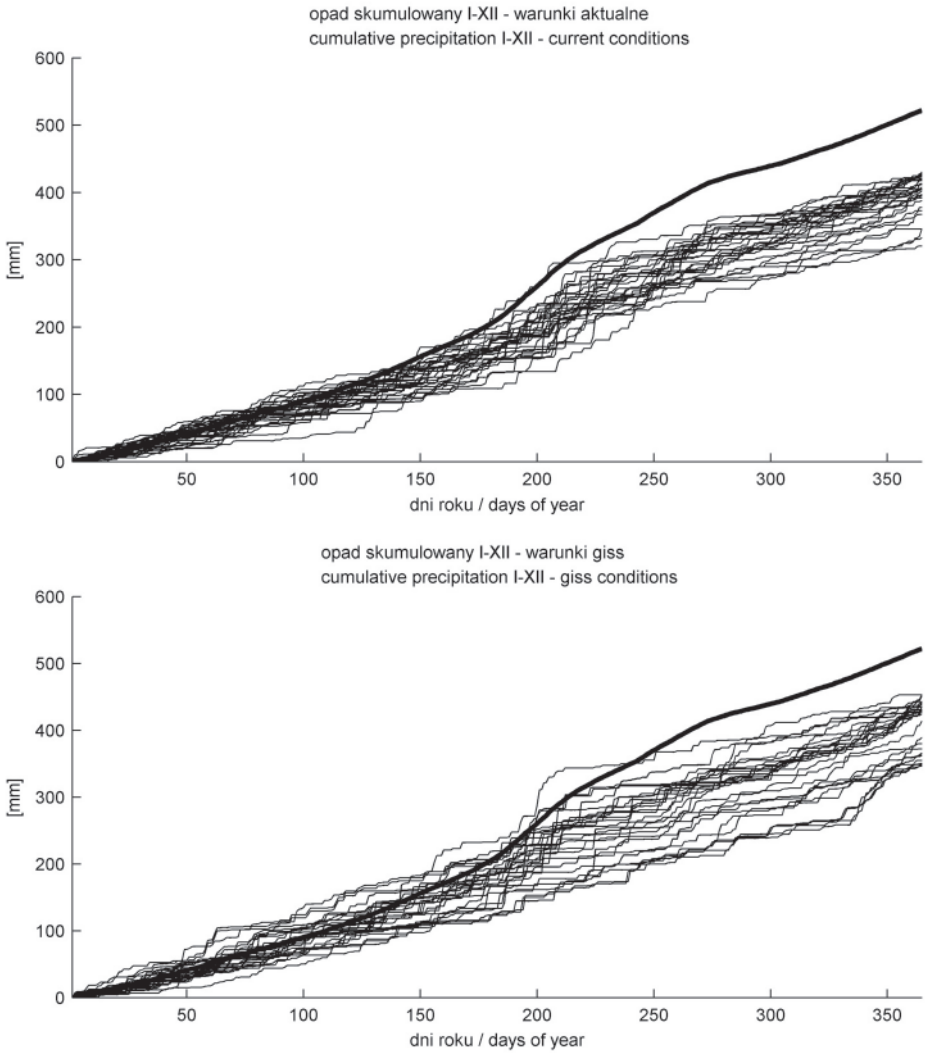
W bloku energetyczno-cieplnym dla określonego stanu dnia, generuje się wartości promieniowania całkowitego i temperatur, wykorzystując uogólniony model liniowy [Kuchar 2003, Richardson 1985]. W przypadku niniejszych badań wykorzystano jedynie blok wodny modelu.

Dla porównania warunków opadowych (aktualne vs. przyszłe, zgodne ze scenariuszem GISS) serie danych zagregowano w różnych okresach czasu, określając dla nich podstawowe miary statystyczne. Dla tych samych okresów roku oszacowano również parametry rozkładu prawdopodobieństwa gamma oraz obliczono wybrane kwantyle [Dowdy i inni 2004].

WYNIKI

Na rysunkach 1-3 przedstawiono roczne przebiegi sum opadów, skumulowane odpowiednio do końca grudnia, sierpnia oraz od kwietnia do sierpnia dla warunków aktualnych (wyżej) i warunków zgodnych ze scenariuszem GISS (niżej). Na każdym wykresie znajduje się po 30 przebiegów (10%) wybranych z ogólnej liczby 300 ciągów o najniższych wartościach sum w rozważanych okresach. Tłem na każdym wykresie jest wygenerowany średni przebieg/suma, utworzona jako skumulowana wartość ze średnich opadów każdego dnia dla

warunków aktualnych (rok 2000). Z tego też powodu, a głównie w końcowej części wykresu średni przebieg ogranicza pozostałe z góry.



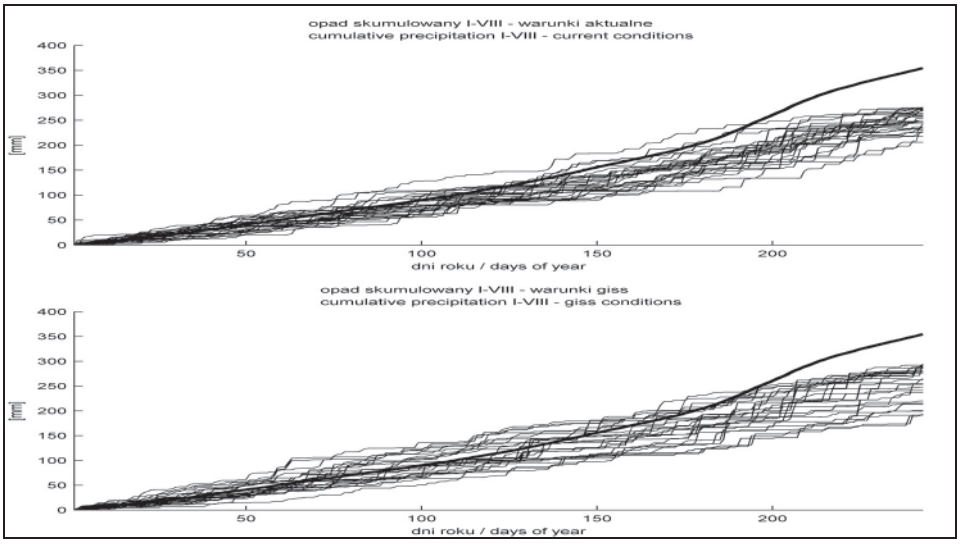
Rysunek 1. Symulowane roczne przebiegi skumulowanych sum opadów dla 30 lat o najniższych sumach dla warunków aktualnych (2000) i przyszłych (GISS, 2050-2060) na tle średniego przebiegu warunków aktualnych

Figure 1. Symulation of annual agregated rainfall course for 30 of 300 years with lowest total for present (2000) and future (GISS, 2050-2060) conditions with average time series graph

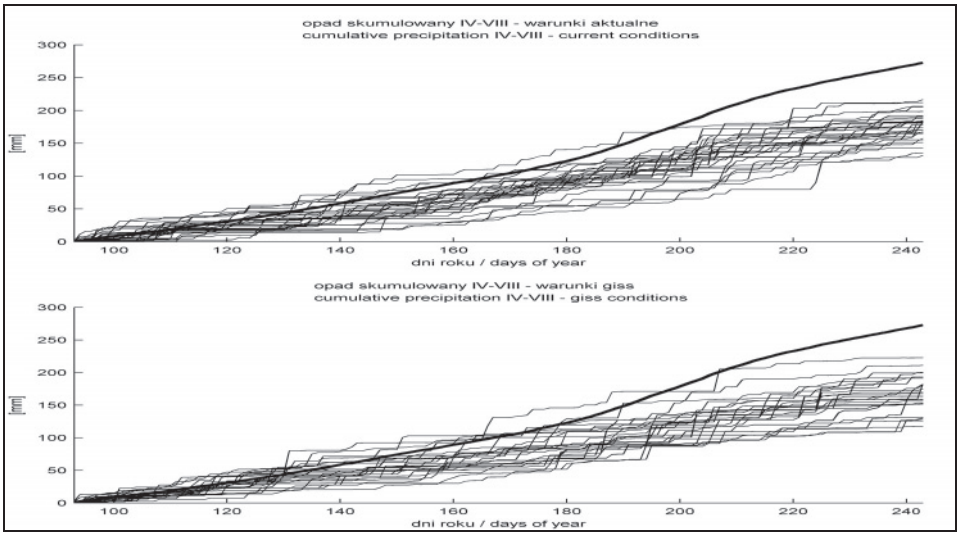
Celem prezentacji przebiegów na rysunkach 1-3 jest wskazanie różnic dla 10% ciągów o najmniejszych sumach dla warunkach aktualnych i oczekiwanych na lata 2050-2060 (GISS Model E).

Porównanie wykresów dla każdego z trzech okresów wskazuje na dwa fakty: wiązka przebiegów w przypadku ciągów otrzymanych dla scenariusza GISS jest nieznacznie przesunięta w górę w stosunku do ciągów utworzonych dla warunków aktualnych; po drugie, ciągi otrzymane dla scenariusza GISS są bardziej rozproszone. Położenie prezentowanych ciągów należy utożsamiać z wartościami średnimi i wariancjami sum opadów w kolejnych dniach roku. Niższe wartości opadów oraz większe ich wariancje oznaczają wzrost ryzyka suszy i posuch rolniczych oraz konieczności stosowania nawodnień. Analiza wykresów wskazuje też na trudność wnioskowania, gdyż z jednej strony opady nieznacznie wzrastają, z drugiej zaś rosną temperatury, które intensyfikują proces parowania – całość przy niebezpiecznym wzroście wariancji.

Problemem niepokojącym jest fakt, że w okresie krytycznym dla okresu wegetacyjnego (kwiecień – sierpień) wzrost opadów jest śladowy, ale wzrost wariancji procesu nadal duży.



Rysunek 2. Symulowane przebiegi (styczeń-sierpień) skumulowanych sum opadów dla 30 lat o najniższych sumach dla warunków aktualnych (2000) i przyszłych (GISS, 2050-2060) na tle średniego przebiegu warunków aktualnych
Figure 2. Symulation of agregated rainfall course (January-August) for 30 of 300 years with lowest total for present (2000) and future (GISS, 2050-2060) conditions with average time series graph



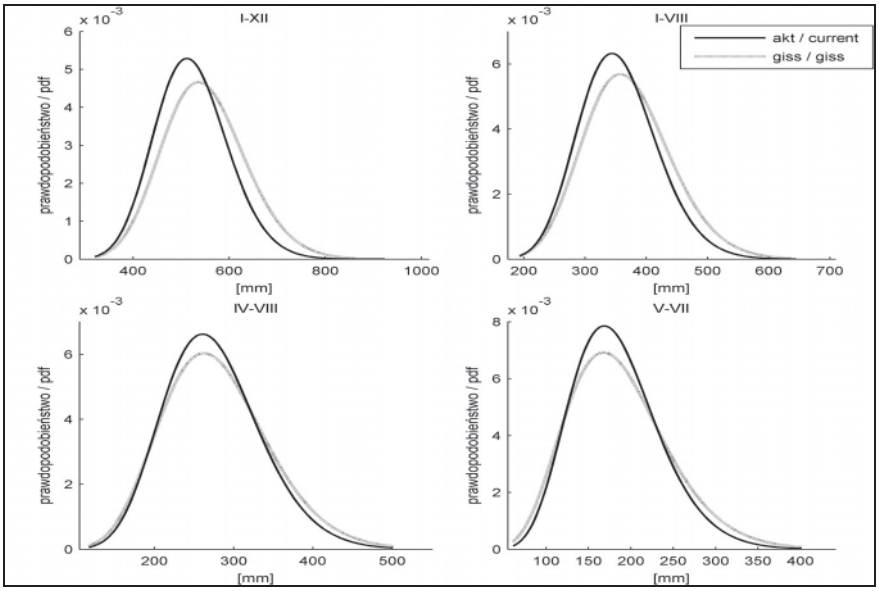
Rysunek 3. Symulowane przebiegi (kwiecień-sierpień) skumulowanych sum opadów dla 30 lat o najniższych sumach dla warunków aktualnych (2000) i przyszłych (GISS, 2050-2060) na tle średniego przebiegu warunków aktualnych
Figure 3. Symulation of agregated rainfall course (April-August) for 30 of 300 years with lowest total for present (2000) and future (GISS, 2050-2060) conditions with average time series graph

Statystykę opisową wybranych okresów podano w tabeli 2. Wartości średnich wieloletnich potwierdzają wcześniej opisane różnice w opadach uzyskane dla warunków aktualnych i oczekiwanych zgodnie ze scenariuszem GISS. Wzrostowi opadów w całym roku (rzędu 10%) towarzyszy niewielki wzrost w okresach krótszych (6%, styczeń-sierpień, kwiecień-maj) lub 0-2% w pozostałych okresach. Wzrost wariancji w rozważanych okresach wynosi od 20 do 30%. Jej zmianie towarzyszy asymetria (wynikająca z rozkładu gamma), zgodnie z którą w większym stopniu rosną wartości maksymalne niż minimalne.

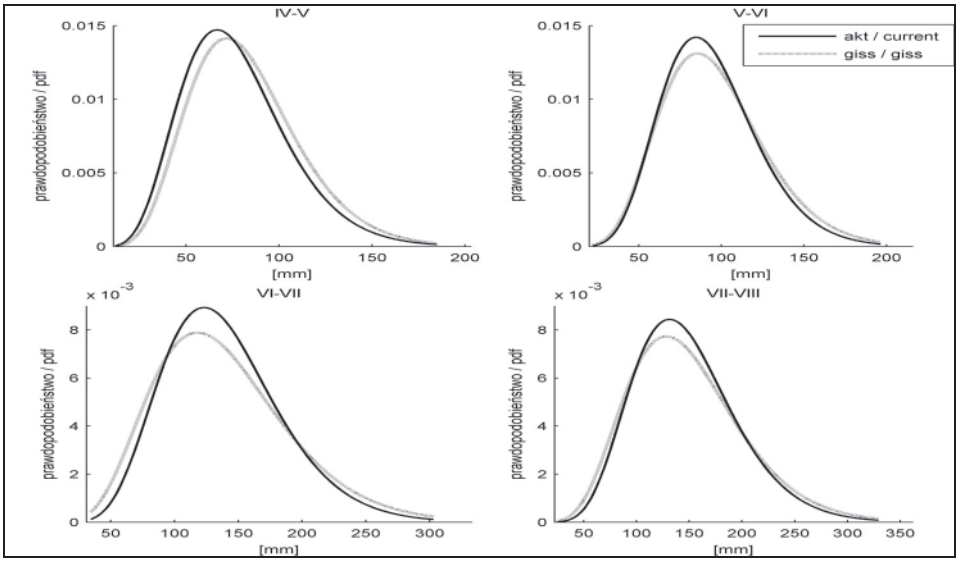
Pełną informację o opadach w wybranych okresach zawierają oszacowane rozkłady prawdopodobieństwa. Wykresy funkcji gęstości umieszczono na rysunkach 4 i 5. W niniejszej pracy ograniczono się jedynie do wskazania różnic pomiędzy rozkładani prawdopodobieństwa oraz do oszacowania prawdopodobieństw dla wybranych wartości krytycznych. Wspomniane wartości umieszczono w tabeli 3.

Tabela 2. Charakterystyka liczbowa opadów w różnych okresach roku dla warunków aktualnych (2000) i lat 2050-2060 (wg scenariusza GISS Model E)
Table 2. Statistics of rainfall within a year for present (2000) and future (2050-2060, according to GISS Model E) conditions

Okres Period	Czas oszacowania Prediction for the year	Średnia Mean	Odch. standard. Std. deviation	Maksimum Maximum	Minimum Minimum
I-XII	2000	512.6	75.9	757.7	320.5
	2050-2060	559.2	87.7	923.4	348.6
I-VIII	2000	355.5	63.7	526.4	205.9
	2050-2060	375.0	70.7	644.7	193.2
IV-VIII	2000	274.6	60.7	439.3	131.4
	2050-2060	278.9	66.9	500.7	117.5
V-VII	2000	183.6	51.5	332.7	60.9
	2050-2060	187.2	58.0	401.2	65.3
IV-V	2000	77.5	28.0	184.8	12.2
	2050-2060	82.6	29.5	180.0	23.2
V-VI	2000	93.8	28.6	188.6	22.1
	2050-2060	96.1	30.8	196.3	28.7
VI-VII	2000	139.0	45.7	302.9	34.3
	2050-2060	139.0	51.0	299.7	35.1
VII-VIII	2000	147.9	48.7	319.7	24.6
	2050-2060	148.4	53.6	329.1	32.3



Rysunek 4. Rozkłady prawdopodobieństwa Γ sum opadów w różnych okresach roku dla warunków aktualnych (2000) i przyszłych (GISS, 2050-2060)
Figure 4. Probability density function (pdf) Γ of total rainfall within the year for present (2000) and future (GISS, 2050-2060) climate conditions



Rysunek 5. Rozkłady prawdopodobieństwa Γ sum opadów w wybranych okresach dwumiesięcznych dla warunków aktualnych (2000) i przyszłych (GISS, 2050-2060)
Figure 5. Probability density function (pdf) Γ of total rainfall within the year (bimonthly periods) for present (2000) and future (GISS, 2050-2060) climate conditions

Wartości krytyczne dla wyznaczenia prawdopodobieństw wystąpienia opadów przyjęto jako wielkości 50 i 75% średnich opadów notowanych dla warunków aktualnych (trzecia i czwarta kolumna) oraz aktualne średnie pomniejszone o aktualne odchylenie standardowe i połowę tego odchylenia (kolumny piąta i szósta). Przyjęcie wartości krytycznych jako aktualnych wartości średnich i odchyleń standardowych miało na celu wskazanie różnic w stosunku do stanu aktualnego.

Tym samym wystąpienie w każdych z dwóch warunków klimatycznych (2000, 2050-2060) danego okresu różnic oznacza zmiany ryzyka wystąpienia danych opadów. W analizowanych okresach zmiany opadów symulowane zgodnie ze scenariuszem GISS w nieznacznym procencie zmniejszają lub zwiększają ryzyko niskich opadów.

Wyjątkiem jest jednak istotny dla rolnictwa dwumiesięczny okres IV-V, gdy prawdopodobieństwo wystąpienia niskich opadów w każdym z czterech przypadków jest mniejsze dla przyszłych warunków klimatycznych. Wartości te można również odczytać z wykresów (rys. 4, rys. 5) pamiętając, że wspomniane prawdopodobieństwa graficznie oznaczają pole pod krzywymi.

Tabela 3. Wartości prawdopodobieństwa wystąpienia opadów dla wybranych wartości krytycznych w różnych okresach roku dla warunków aktualnych (2000) i lat 2050-2060 (wg scenariusza GISS Model E).

Table 3. Probabilty of total rainfall occurance for selected critical values for present (2000) and future (2050-2060, according to GISS Model E) conditions

Okres Period	Oszacowanie dla roku Prediction for the year	$P(X<0.5\mu)$	$P(X<0.75\mu)$	$P(X<\mu-0.5\sigma)$	$P(X<\mu-\sigma)$
I-XII	2000	0.000	0.030	0.350	0.150
	2050-2060	0.000	0.037	0.193	0.087
I-VIII	2000	0.000	0.067	0.333	0.163
	2050-2060	0.000	0.060	0.240	0.083
IV-VIII	2000	0.007	0.130	0.317	0.157
	2050-2060	0.017	0.117	0.290	0.143
V-VII	2000	0.030	0.197	0.317	0.150
	2050-2060	0.060	0.213	0.297	0.190
IV-V	2000	0.053	0.263	0.337	0.123
	2050-2060	0.040	0.233	0.273	0.110
V-VI	2000	0.027	0.213	0.353	0.140
	2050-2060	0.053	0.200	0.303	0.147
VI-VII	2000	0.057	0.233	0.333	0.147
	2050-2060	0.097	0.237	0.317	0.183
VII-VIII	2000	0.030	0.247	0.357	0.160
	2050-2060	0.070	0.240	0.340	0.173

DYSKUSJA

Przedstawione symulacje przeprowadzone dla północnej części centralnej Polski wskazują na brak lub nieistotny , z punktu widzenia produkcji roślinnej wzrost opadów w okresie wegetacji od kwietnia do sierpnia. Jednocześnie zjawisku temu towarzyszy wzrost wariancji opadów do 30% z asymetrią w kierunku wielkości maksymalnych. Ponieważ zgodnie ze znanymi scenariuszami liczba dni z opadem w badanych okresach nie ulegnie istotnym zmianom [Schmidt i in. 2006], liczba posuch nie powinna również ulec większym zmianom. Jednak, ze względu na wzmożone procesy parowania przy temperaturach wyższych średnio o ponad 2.5C towarzyszyć będzie większy deficyt wody użytecznej. Fakt ten oznacza większe zapotrzebowanie wody do nawadniania roślin, szczególnie na glebach lekkich [Grabarczyk i in. 1994; Rolbiecki i in. 2007]. O ich stosowaniu na pewno zadecydują względy ekonomiczne.

Przeprowadzone badania skłaniają również do wniosku, że pełną odpowiedź na pytania dotyczące wykorzystania zasobów wodnych dla potrzeb produkcji roślinnej będzie można uzyskać po wykonaniu symulacji z wykorzystaniem modeli opisujących wzrost roślin, zasoby wody w glebie, modeli sterujących nawadnianiem oraz generowanych danych meteorologicznych [Bąk 2009; Howell i in. 1997; Kittel i in. 1998; Kuchar 2004].

Mając jednocześnie długą perspektywę oczekiwanych zmian klimatycznych można byłoby również podjąć inne działania adaptacyjne takie jak nowa rejonizacja dla obszaru Polski, badania odmianowe roślin mające na celu uzyskanie/dopasowanie do nowych warunków czy studia porównawcze klimatu. 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 dwóch podstawowych wniosków:

1. Przewidywane na lata 2050-2060 zmiany opadów w kluczowym okresie wegetacji roślin: kwiecień-sierpień, zgodnie ze scenariuszem zmian klimatu GISS dla północnej części centralnej Polski, wskazują na nieznaczny (6%) lub nieistotny wzrost opadów, co łącznie z 30% wzrostem wariancji oraz zmianami temperatur oznacza rosnące zapotrzebowania na nawadnianie roślin oraz wystąpienie większego ryzyka deficytu wody użytecznej dla roślin.
2. Wstępne badania opadów sugerują również konieczność kompleksowych badań symulacyjnych wzrostu roślin z uwzględnieniem innych zmiennych meteorologicznych (promieniowanie całkowite, temperatury powietrza, parowania) dla określania potrzeb wodnych. Studia powinny prowadzić do oceny możliwości adaptacyjnych dla nowych warunków klimatycznych z uwzględnieniem potrzeb nawadniania i ich aspektami ekonomicznymi.

BIBLIOGRAFIA

Bąk B. *Ocena redukcji ewapotranspiracji buraków cukrowych na podstawie opadów*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 3, 2009, s. 101-108.

Budzyński W., Krasowicz S. *Produkcja zbóż w Europie i w Polsce na przełomie XX i XXI wieku*, Fragmenta Agronomica, 1(97), 2008, s. 50–66.

Dowdy S., Wearden S., Chilko D. *Statistic for Research*, Wiley-Interscience NY, 2004.

Drupka S., Gruszka J., Kuźniar A. *Practical method of sprinkler irrigation scheduling in the Kujawy region,* Przegląd Naukowy WIiKŚ SGGW, 22, 2001, s. 29–39.

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. *Rolnictwo w warunkach nawadniania,* PWN Warszawa, 1988.

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

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

Grabarczyk S., Dudek S., Grzelak B., Peszek J., Rzekanowski C., Żarski J. *Możliwości produkcyjne gleby bardzo lekkiej w warunkach deszczowania*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 414, 1994, s. 145–152.

Howell T.A., Schneider A.D., Evett S.R. *Subsurface and surface microirrigation of corn*, Trans. ASAE, 40 (3), 1997, s. 635-641.

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.

Lamm F.R., Trooien T.P. *Subsurface drip irrigation for corn production: a reviev of 10 years of research in Kansas*, Irrig Sci., 22, 2003, s. 195–200.

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.

Mazurczyk W., Wierzbicka A., Lutomirska B. *Klimatyczne uwarunkowania produkcji biomasy ziemniaka w Polsce Centralnej,* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 500, 2004, s. 219–224.

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

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.

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

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.

Żarski J. *Efekty deszczowania zbóż jarych na glebie bardzo lekkiej*, Zeszyty Naukowe ATR Bydgoszcz, 180, Roln. 32, 1992, s. 101–108.

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

Prof. dr hab. Leszek Kuchar
Dr Sławomir Iwański
Katedra Matematyki
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Grunwaldzka 53
50-357 Wrocław
Leszek.Kuchar@gmail.com

Recenzent: *Prof.dr hab. Jacek Żarski*