

**Leszek KUCHAR¹, Sławomir IWAŃSKI¹, Leszek JELONEK²,
Wiwiana SZALIŃSKA²**

¹Katedra Matematyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Department of Mathematics, Wrocław University of Environmental and Life Sciences

²Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział we Wrocławiu
Institute of Meteorology and Water Management, Wrocław Branch

Zastosowanie danych syntetycznych do badania wpływu zmian klimatu na zasoby wodne zlewni

Application of synthetic data for assessment of climate change impact on water resources of basin

Słowa kluczowe: generowanie danych meteorologicznych, model opad-odpływ, scenariusze zmiany klimatu, zlewnia rzeki Kaczawy
Key words: weather generators, downscaling, rainfall-runoff model, climate change, Kaczawa river basin

Wprowadzenie

W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie badaniami zajmującymi się wpływem zmian klimatu na zasoby wodne zlewni. W badaniach tych istotne miejsce zajmują globalne (Atmosphere-Ocean Global Climate Model – AOGCM) i regionalne (RCM) modele klimatyczne oraz modele hydrologiczne (Gates, 1985, Gleick, 1987, Gleick, 1989, Barrow, Hulme i Semenov, 1996, Mearns, Rosezweig i Goldberd, 1997,

Landman, Mason, Tyson i Tennant, 2001, Guo, Wang, Xiong, Menzel i Burger, 2002, Ying i Li, 2002, Covey i inni, 2003, Xu, Widen i Halldin, 2005, Boé, Terray, Habets i Martin, 2007, Chen, Guo, Xu i Singh, 2007, Le Treut i inni, 2007). Modele globalne (AOGCMs) umożliwiają uzyskanie zbiorczej charakterystyki dla wybranych zmiennych klimatycznych (np. temperatura, opad atmosferyczny, ciśnienie powietrza, wilgotność, prędkość wiatru) o dużej rozdzielczości przestrzennej, najczęściej w postaci siatki o rozdzielczości ok. 150–300 km, i dużej rozdzielczości czasowej – charakterystyki roczne, sezonowe, miesięczne (Randall i inni, 2007, Schoof, Pryor i Robeson, 2007). Modele hydrologiczne zaś potrzebują danych w skali lokalnej – o dużo większej rozdzielczości przestrzennej oraz czasowej (dane dobowe,

godzinowe). Niezgodna skala jest jednym z głównych problemów przy stosowaniu globalnych modeli i modeli hydrologicznych. Dlatego wyniki uzyskane z AOGCM nie mogą zostać bezpośrednio wykorzystane w modelach hydrologicznych (Fowler, Blenkinsop i Tebaldi, 2007) i muszą zostać przeskalowane (downscaling).

Istnieją dwa główne podejścia do skalowania: dynamiczne (obliczeniowo bardziej wymagające) oraz statystyczne.

W skalowaniu dynamicznym regionalny model klimatyczny (RCM) jest ustawiony dla danego obszaru. Wykorzystując zmienne w czasie atmosferyczne warunki brzegowe uzyskane z AOGCM oraz m.in. złożone cechy topograficzne, niejednorodność pokrycia terenu, można uzyskać rozdzielczości ok. 12–50 km (Chen, Xu i Guo, 2012).

Skalowanie statystyczne polega na ustaleniu zależności między AOGCM (lub RCM) a klimatem lokalnym. Podstawowym założeniem jest fakt, że zależność między skalą globalną a skalą lokalną pozostanie w przyszłości niezmienną. Jest to także główna wada tej techniki z racji, że założenie to nie może zostać zweryfikowane (Fowler i inni, 2007). Metody skalowania statystycznego można podzielić na trzy główne grupy: modele regresyjne, generatory danych meteorologicznych (weather generators), schematy opisujące dane meteorologiczne (Kidson i Thompson, 1998, Wilby, Hassan i Hanaki, 1998, Fowler i inni, 2007).

Modele regresyjne bezpośrednio opisują zależność między zmienną meteorologiczną w skali lokalnej (np. temperatura maksymalna, opad atmosferyczny) a zbiorem zmiennych atmo-

sferycznych w skali globalnej (Hellström, Chen, Achberger i Raisanen, 2001, Wilby, Conway i Jones, 2002a, Huth, 2004, Hessami, Gachon, Ouarda i St-Hilaire, 2008). Generatory danych meteorologicznych umożliwiają symulowanie wartości poszczególnych zmiennych w skali lokalnej na podstawie zbiorczej charakterystyki globalnej (Richardson, 1981, Wilks, 1992, Katz, 1996, Semenov, Brooks, Barrow i Richardson, 1998, Wilks, 1998, Hayhoe, 2000, Parlange i Katz, 2000, Buishand i Brandsma, 2001, Wilby, Dawson i Barrow, 2002b, Beersma i Buishand, 2003, Iwański i Kuchar, 2003, Kuchar, 2004, Kilsby i inni, 2007, Burton, Kilsby, Fowler, Cowpertwait i O'Connell, 2008, Semenov i Stratonovitch, 2010, Kuchar, 2011, Kuchar, Iwanski, Jelonek i Szalinska, 2014a, Kuchar, Iwanski, Jelonek i Szalinska, 2014b). Schematy polegają na grupowaniu dni w sekwencje charakteryzujące typy/stany pogody według podobieństwa synoptycznego. Wyniki modeli globalnych/regionalnych są wykorzystywane do oszacowania zmian w częstości występowania poszczególnych stanów pogodowych (Wilby, 1994, Buishand i Brandsma, 1997, Rajagopalan i Lall, 1999, von Zorita i Storch, 1999, Fowler, Kilsby, O'Connell i Burton, 2005, Boé, Terray, Habets i Martin, 2006).

Uzyskane jedną ze wspomnianych wcześniej metod syntetyczne dane meteorologiczne charakteryzujące potencjalne warunki klimatyczne można wykorzystać w modelach hydrologicznych do oceny wpływu zmian klimatu na zasoby wodne zlewni (Burn, 1994, Jones, Chiew, Boughton i Zhang, 2006, Merritt i inni, 2006, Minville, Brissette i Leconte, 2008).

W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie modelu generującego przestrzenne dane meteorologiczne SWGEN do uzyskania syntetycznych danych meteorologicznych na potrzeby modelu hydrologicznego opad-odpływ dla 19 stacji pomiarowych rozmieszczonych na obszarze zlewni rzeki Kaczawy i w jej sąsiedztwie. Dane zostały wygenerowane na podstawie informacji pochodzących z modelu HadCM3 na 2080 rok dla scenariusza emisyjnego A1B.

Material i metody

Badania zostały przeprowadzone dla obszaru zlewni rzeki Kaczawy, która jest lewostronnym dopływem Odry w jej środkowym biegu (rys. 1). Powierzchnia zlewni Kaczawy to 2261,3 km², a całkowita długość rzeki wynosi 83,9 km. Rzeka rozpoczyna swój bieg na wysokości ok. 550 m n.p.m. w Górach Kaczawskich, w południowej części zlewni. Kaczawa ma kilka dopływów o zróżnicowanym reżimie hydrologicznym. Lewostronny dopływ to Czarna

Woda, której dopływem jest Skora. Prawostronne główne dopływy Kaczawy to Nysa Szalona i Wierzbiak. Na kształtowanie się odpływu ze zlewni Kaczawy wpływa wielozadaniowy zbiornik Słup zlokalizowany na Nysie Szalonej oraz zbiorniki przeciwpowodziowe Świerzawa na Kamienniku i Bolków na Rachowickiej Wodzie. Lokalnie mogą one zredukować kulminację fal powodziowych, jednak nie wpływają istotnie na bilans wodny zlewni. Około 26% powierzchni zlewni Kaczawy zajmują lasy, a ponad 60% – tereny uprawne.

Do badań wybrano 24 stacje z sieci pomiarowo-obszaryjnej Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW położone na obszarze zlewni (19 stacji) i w jej otoczeniu (5 stacji) obejmujące stacje meteorologiczne oraz hydrologiczne (tab. 1). Dane obejmowały obserwacje z lat 1981–2005. W obszarze zlewni znajduje się stacja hydrologiczna w Piątnicy badająca większość powierzchni zlewni, dla której istnieje wieloletni ciąg zweryfikowanych obserwacji hydrologicznych.



RYSUNEK 1. Lokalizacja zlewni Kaczawy
FIGURE 1. Location map of the Kaczawa river basin

TABELA 1. Wykaz stacji z dobowymi obserwacjami zmiennych meteorologicznych
 TABLE 1. List of sites with daily observations

Miejscowość Site	Typ stacji Type of station	Położenie geograficzne Location		Dostępne dane Available data						
		długość longitude	szerokość latitude							
Bolków	O	16°06'E	50°55'N							P
Chocianów	O	15°55'E	51°25'N							P
Chojnów	O	15°56'E	51°17'N							P
Chwałkowie	O	16°37'E	51°27'N			T _{min}	T _{sr}	T _{max}		P
Dobromierz	O	16°15'E	50°55'N							P
Iwiny	O	15°42'E	51°12'N							P
Jawor	O	16°11'E	51°03'N							P
Jelenia Góra	S	15°48'E	50°54'N		US	T _{min}	T _{sr}	T _{max}		
Kaczorów	O	15°58'E	50°55'N							P
Legnica	S	16°12'E	51°12'N	SR	US	T _{min}	T _{sr}	T _{max}		P
Leszno	S	16°32'E	51°50'N		US	T _{min}	T _{sr}	T _{max}		
Lubin	O	16°12'E	51°24'N							P
Polkowice Dolne	O	16°03'E	51°30'N			T _{min}	T _{sr}	T _{max}		P
Pszemno	K	16°33'E	50°51'N			T _{min}	T _{sr}	T _{max}		
Stanisławów	O	16°01'E	51°04'N							P
Strzegom	O	16°21'E	50°58'N							P
Tomaszów Górny	K	15°41'E	51°17'N			T _{min}	T _{sr}	T _{max}		P
Twardocice	O	15°45'E	51°06'N							P
Wojcieszów Dolny	O	15°55'E	50°59'N							P
Wrocław	S	16°53'E	51°06'N		US	T _{min}	T _{sr}	T _{max}		
Zagrodno	O	15°52'E	51°12'N							P
Zgorzelec	K	15°02'E	51°08'N			T _{min}	T _{sr}	T _{max}		
Zielona Góra	S	15°32'E	51°56'N		US	T _{min}	T _{sr}	T _{max}		
Złotoryja	O	15°56'E	51°07'N							P

Oznaczenia: K – stacja klimatyczna, O – stacja opadowa, S – stacja synoptyczna; SR – promieniowanie słoneczne, US – usłonecznienie, T_{max} – temperatura maksymalna, T_{min} – temperatura minimalna, T_{sr} – średnia temperatura, P – suma opadów.

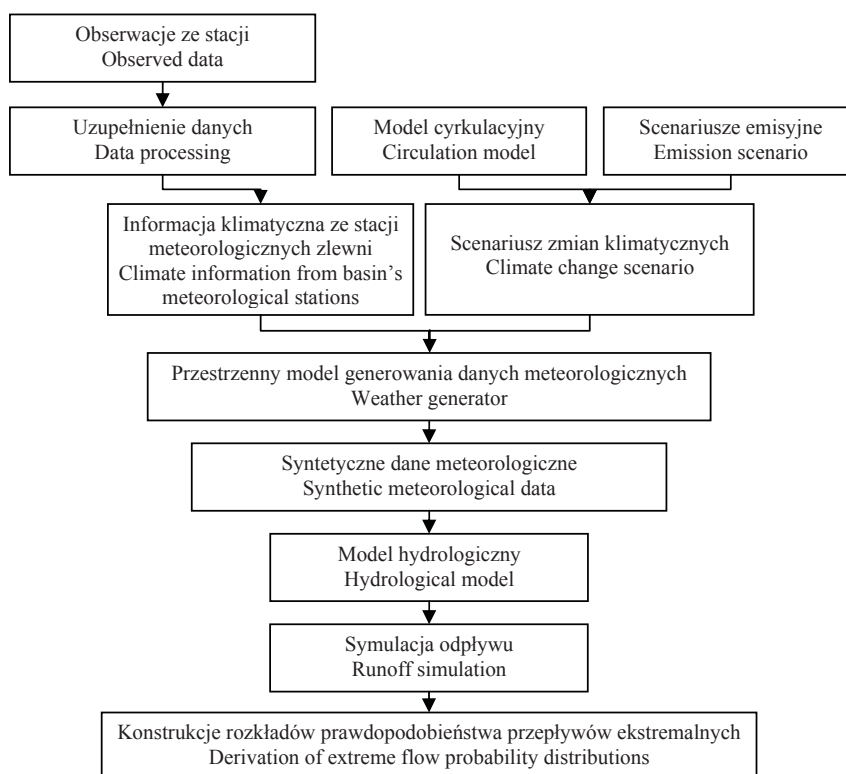
Notations: K – climatic station, O – rainfall station, S – synoptic station; SR – solar radiation, US – sunshine, T_{max} – maximum temperature, T_{min} – minimum temperature, T_{sr} – mean temperature, P – total precipitation.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat przeprowadzenia symulacji syntetycznych danych meteorologicznych. W pierwszej kolejności został wybrany scenariusz emisyjny (A1B), według którego przeprowadzono projekcję zmian klimatu. Scenariusz A1B zakłada szybki wzrost gospodarki światowej oraz populacji, którego szczyt zostanie osiągnięty w połowie XXI wieku. Przyjmuje także szybki rozwój nowych, bardziej wydajnych technologii. Zakłada wyrównanie gospodarcze pomiędzy regionami wraz ze wzrostem kulturowych i społecznych powiązań. Według tego scenariusza wy-

tworzenie energii będzie wykorzystywać w sposób równomierny źródła kopalne i niekopalne (Solomon i inni, 2007).

Następnym etapem było uzyskanie globalnych zmian z wykorzystaniem modelu CGCM3.1/T47 (Scinocca, McFarlane, Lazare, Li i Plummer, 2008). Scenariusz zawiera między innymi zmiany dla temperatury i opadu atmosferycznego dla określonego horyzontu czasowego – w badaniach przyjęto 2080 rok. Uzyskane zmiany przedstawiono w tabeli 2.

Dla czterech stacji (Jelenia Góra, Leszno, Wrocław, Zielona Góra) wartość promieniowania całkowitego została



RYSUNEK 2. Schemat symulacji syntetycznych danych meteorologicznych według scenariusza zmian klimatu na potrzeby modelowania hydrologicznego

FIGURE 2. Diagram of synthetic meteorological data simulation according to climate change scenario for hydrological modeling

oszacowana na podstawie usłonecznienia za pomocą wzoru Blacka (Angström, 1924, Bac i Rojek, 1999):

$$SR = SR_0 \left(0,18 + 0,62 \frac{US}{US_0} \right)$$

gdzie:

SR – wielkość promieniowania całkowitego,

SR_0 – promieniowanie słoneczne w górnej granicy atmosfery,

US – usłonecznienie rzeczywiste,

US_0 – usłonecznienie możliwe (astronomiczna długość dnia).

rzystując metodę interpolacji odwrotnej odległości, a niedostępne wartości korelacji między zmiennymi pochodzącymi z różnych stacji oszacowano na podstawie odległości tych stacji, wykorzystując zależności liniowe. W celach testowych przeprowadzono symulacje dla aktualnych warunków klimatycznych, generując 500 lat dobowych wartości temperatury maksymalnej, minimalnej, średniej, promieniowania słonecznego, opadu atmosferycznego i usłonecznienia dla wszystkich 24 stacji. Po weryfikacji modelu wykorzystano scenariusz zmian klimatu do zmodyfikowania poszczególnych

TABELA 2. Zestawienie zmian temperatury (T) i opadu atmosferycznego (P) dla 2080 roku
TABLE 2. Changes in temperature (T) and precipitation (P) for the year 2080

Miesiąc Month	T średnia T mean [°C]	T odchylenie standardowe T standard deviation [%]	P średnia P mean [%]	P odchylenie standardowe P standard deviation [%]
I	6,2	-66,8	39,1	141,6
II	7,8	-85,2	5,6	11,7
III	5,2	84,1	42,5	-59,8
IV	4,8	243,6	58,4	180,2
V	3,2	-73,8	22,8	113,1
VI	3,3	-42,4	-9,2	-31,7
VII	2,7	-96,8	-19,4	-81,0
VIII	2,3	68,3	-1,8	-62,1
IX	3,9	50,4	-0,3	180,6
X	2,3	-12,1	-2,3	-91,3
XI	2,9	-99,3	-2,0	152,8
XII	2,5	20,6	17,8	-92,2

W następnym kroku do uzyskania danych syntetycznych wykorzystano model SWGEN umożliwiający generowanie przestrzennych dobowych danych meteorologicznych (Iwański i Kuchar, 2003, Kuchar i inni, 2014a). Brakujące statystyki opisowe uzupełniono, wyko-

nych charakterystyk i wygenerowania następnych 500 lat dobowych obserwacji odpowiadających warunkom klimatycznym projektowanym przez scenariusz zmian klimatu dla 2080 roku. Tak duże próby umożliwiają w dalszych etapach uzyskać informacje o rozkładach analizowanych zmiennych hydrologicznych.

Syntetyczne dane uzyskane z modelu SWGEN zostały uzupełnione o wielkość parowania potencjalnego, które było wymagane przez model hydrologiczny. Dla miesięcy, kiedy temperatura średnia była większa od 10°C, wielkość parowania została oszacowana na podstawie zmodyfikowanego wzoru Turca (Bac i Kuchar, 2001, Kuchar i Bac, 2006):

$$E_p = a_0 + a_1 T_{sr} \frac{a_2 SR + a_3}{T_{sr} + a_4}$$

a dla pozostałych miesięcy wykorzystano model liniowy (Bac i inni, 2008):

$$E_p = b_0 + b_1 T_{sr} + b_2 SR$$

gdzie:

a_i, b_i – parametry poszczególnych modeli,

E_p – parowanie potencjalne,

T_{sr} – średnia temperatura powietrza,

SR – suma promieniowania całkowitego (wszystkie wielkości mierzone w okresach miesięcznych).

Do symulacji hydrologicznych wykorzystano model Mike SHE. Zlewnia rzeki Kaczawy została podzielona na części odpowiadające dostępnej sieci stacji pomiarowych. Topografia zlewni została opisana przez cyfrowy model terenu. Model uwzględnia odpływ powierzchniowy, ewapotranspirację, przepływ wody w gruncie oraz wody podziemne. Model bierze także pod uwagę akumulację i topnienie pokrywy śnieżnej.

Wyniki

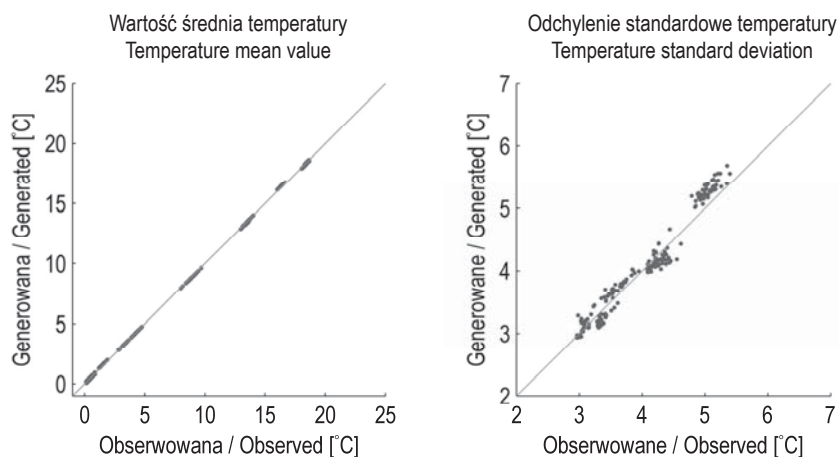
Walidacja przestrzennego generatora danych meteorologicznych SWGEN została przeprowadzona na podstawie 500

rocznych sekwencji odpowiadających aktualnym warunkom klimatycznym. Porównano wartości miesięcznych charakterystyk poszczególnych zmiennych dla wszystkich stacji, wykorzystując odpowiednie testy dla wartości średnich, wariancji, proporcji przy porównywaniu liczby dni z opadem oraz współczynnika korelacji liniowej.

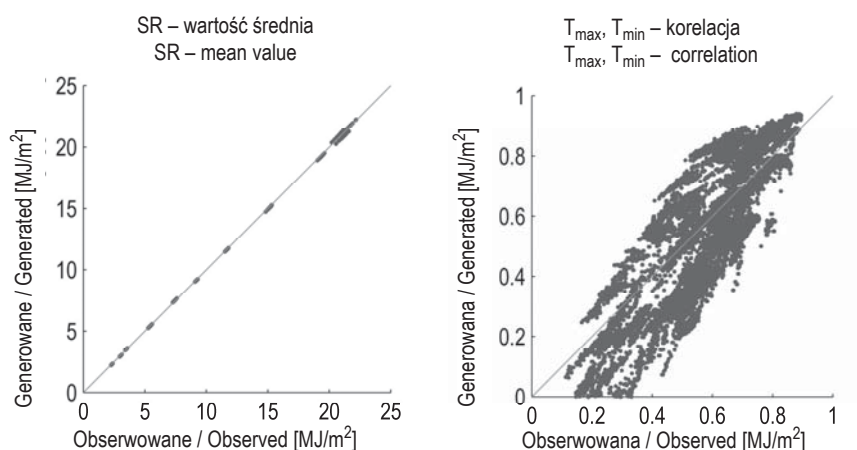
Zbiórce wyniki przedstawiono na wykresach (rys. 3–6). Największe trudności stwierdzono przy odzwierciedleniu odchylenia standardowego dla opadu (rys. 5) oraz korelacji (rys. 4).

Wygenerowane dane zostały przekazane do modelu hydrologicznego Mike SHE. Na podstawie uzyskanych wartości odpływów godzinowych oszacowano prawdopodobieństwa przewyższenia odpływu maksymalnego oraz prawdopodobieństwo przekroczenia czasu trwania niżówki w ujęciu rocznym dla zmienionych warunków klimatycznych prognozowanych na 2080 rok według wybranego scenariusza zmian klimatu. Przy szacowaniu rozkładów prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych przyjęto rozkład logarytmiczno-normalny. Do analizy czasu trwania niżówek wybrano uogólniony rozkład wartości ekstremalnych. Dodatkowo wybrano tylko te niżówki, które trwały dłużej niż 20 dni, a jako wartość graniczną przyjęto przepływ średni niski SNQ = 1,9 m³/s.

Według uzyskanych wyników prawdopodobieństwo przewyższenia określonej wielkości przepływu będzie znacznie mniejsze. Dla przepływu maksymalnego wynoszącego 100 m³/s prawdopodobieństwo przewyższenia zmniejszy się z ok. 10 do prawie 1%, a dla przepływu 150 m³/s z 2 do ok. 0,1% (rys. 7). W przypadku przepływów niskich



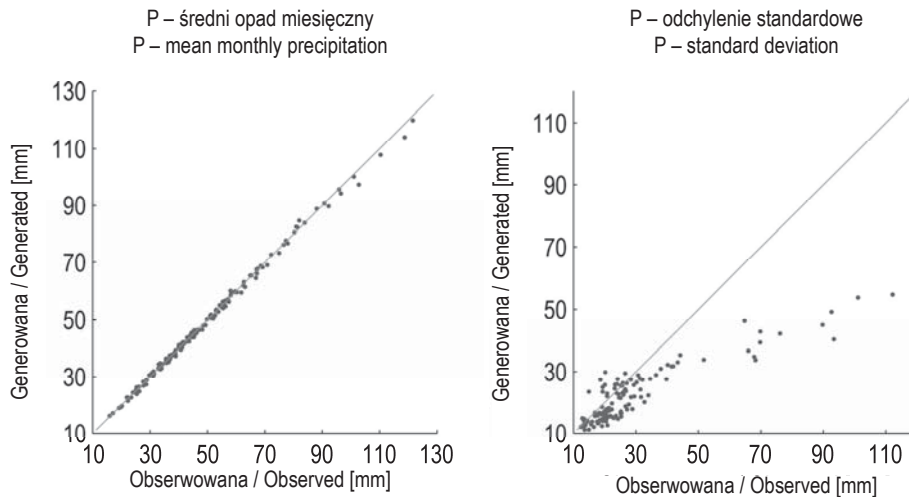
RYSUNEK 3. Porównanie wartości średnich (z lewej) i odchylenia standardowego (z prawej) dla wartości temperatury uzyskanych dla danych obserwowanych i generowanych
 FIGURE 3. Comparison of mean values (left) and standard deviation (right) for the temperatures obtained for the observed and generated data



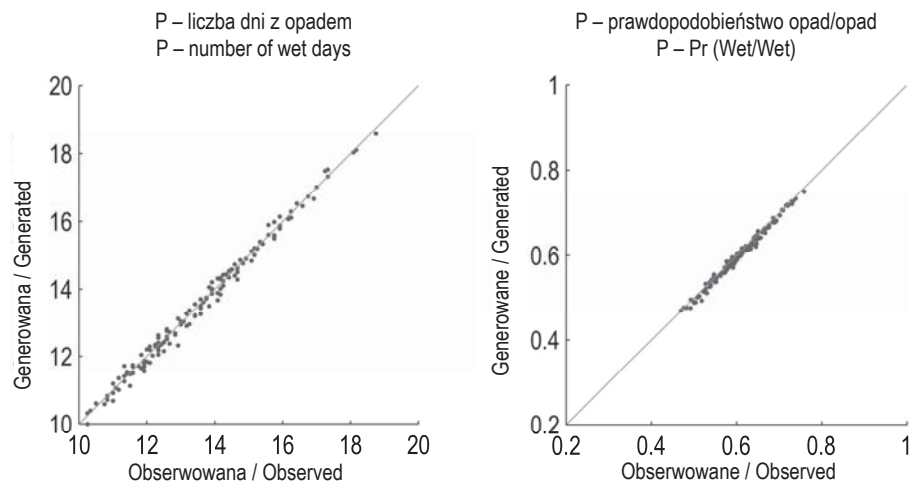
RYSUNEK 4. Porównanie wartości średnich dla promieniowania słonecznego (z lewej) i korelacji wartości temperatury (z prawej) uzyskanych dla danych obserwowanych i generowanych
 FIGURE 4. Comparison of mean values for solar radiation (left) and correlation of temperatures (right) obtained for the observed and generated data

zmniejszy się prawdopodobieństwo wystąpienia niżówek o łącznym czasie trwania w ciągu roku powyżej 95 dni. Niżówki o krótszym łącznym czasie trwania będą występować częściej, przy czym prawdopodobieństwo niżówek krótszych niż 50 dni w skali roku będzie

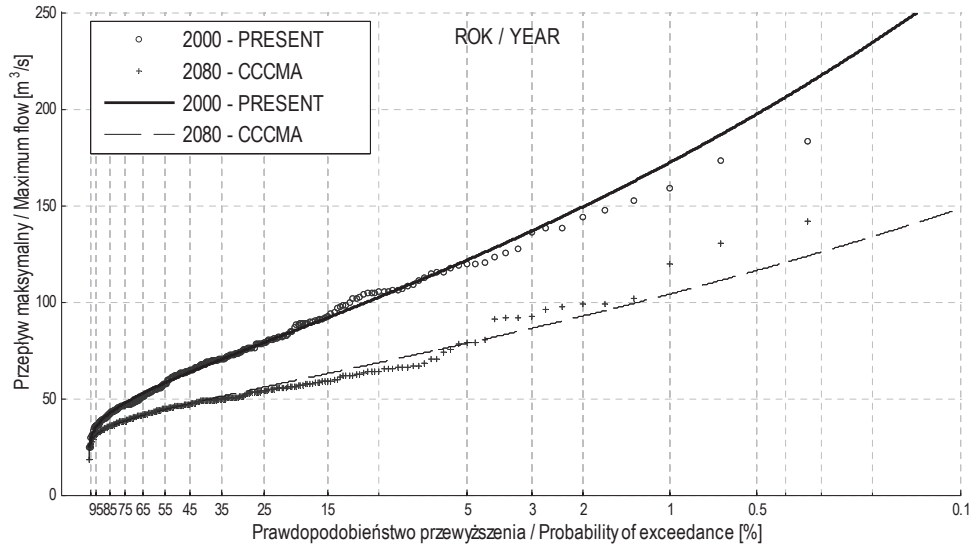
porównywalne do warunków obecnych (rys. 8). Równocześnie zmniejszy się prawdopodobieństwo niżówek z deficytem większym niż 96 mln m³ w skali roku, a niżówek z deficytem mniejszym niż 96 mln m³ będzie większe niż obecnie (rys. 9).



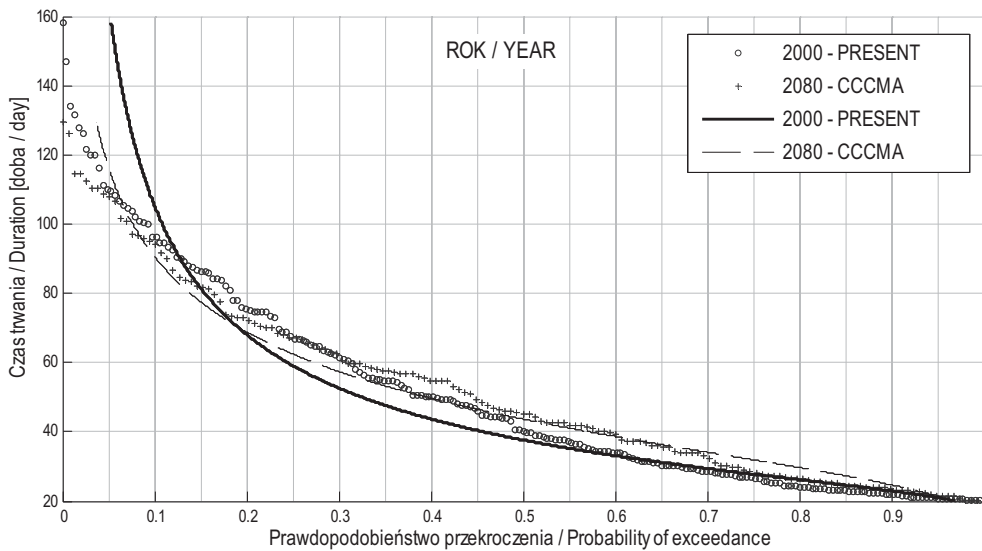
RYSUNEK 5. Porównanie wartości średniego opadu miesięcznego (z lewej) i odchylenia standardowego dla opadu (z prawej) uzyskanych dla danych obserwowanych i generowanych
FIGURE 5. Comparison of mean values for precipitation amount (left) and standard deviation (right) obtained for the observed and generated data



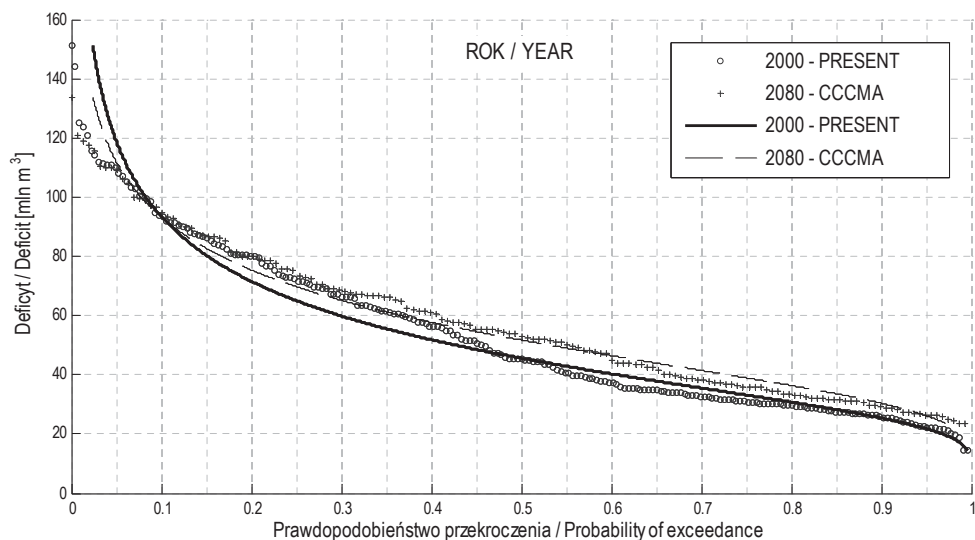
RYSUNEK 6. Porównanie liczby dni z opadem (z lewej) i prawdopodobieństwa przejścia dzień z opadem na dzień z opadem (z prawej) uzyskanych dla danych obserwowanych i generowanych
FIGURE 6. Comparison of number of wet days (left) and transition probability from wet day to wet day (right) obtained for the observed and generated data



RYSUNEK 7. Prawdopodobieństwo przewyższenia przepływu maksymalnego dla aktualnych warunków klimatycznych (2000) oraz wygenerowanych dla horyzontu czasowego (2080)
 FIGURE 7. Probability of exceedance of maximum flow for current climate conditions (2000) and generated for time horizon (2080)



RYSUNEK 8. Prawdopodobieństwo przekroczenia czasu trwania niżówki dla aktualnych warunków klimatycznych (2000) oraz wygenerowanych dla horyzontu czasowego (2080)
 FIGURE 8. Probability of exceedance of duration time of low flow for current climate conditions (2000) and generated for time horizon (2080)



RYSUNEK 9. Prawdopodobieństwo przekroczenia wielkości deficytu dla aktualnych warunków klimatycznych (2000) oraz wygenerowanych dla horyzontu czasowego (2080)
 FIGURE 9. Probability of exceedance of deficit for current climate conditions (2000) and generated for time horizon (2080)

Wnioski

Z przeprowadzonych badań związanych z walidacją modelu przestrzennego generatora danych meteorologicznych SWGEN można wywnioskować, że model ten nadaje się do zastosowań związanych z analizą zmian klimatycznych. Model bardzo dobrze odwzorowuje wszystkie charakterystyki klimatyczne, z wyjątkiem odchylenia standardowego wielkości opadu atmosferycznego, które wymaga niewielkiej poprawy. Zastosowanie modelu SWGEN jako narzędzia skalującego wyniki modeli cyrkulacyjnych w połączeniu z modelem hydrologicznym opad-odpływ Mike SHE umożliwia zatem badanie wpływu potencjalnych zmian klimatycznych, prognozowanych przez zadane scenariusze zmian klimatu na gospodarkę wodną wybranej zlewni.

Przeprowadzane symulacje umożliwiają wskazanie zmian ilościowych dla przyjętych scenariuszy zmian klimatycznych. Można zauważyć, że prognozowane na 2080 rok przez wybrany model podwyższenie średniej temperatury oraz wzrost wielkości opadu w pierwszym półroczu oraz niewielki ich spadek w drugim półroczu (z wyjątkiem lipca i grudnia) może spowodować zmniejszenie prawdopodobieństw przewyższenia przepływów maksymalnych, a także zmniejszy się prawdopodobieństwo występowania długotrwałych niżówek, a częstość występowania niżówek trwających krócej niż dwa miesiące nie powinno ulec zmianie. Jednocześnie patrząc pod kątem deficytu, można zauważyć, że niżówki z mniejszym deficytem będą częstsze, a te z deficytem większym rzadsze.

Dzięki symulowaniu dużej liczby danych możliwe jest uzyskanie rozkładów prawdopodobieństwa, które dają pełną informację na temat zachowania się analizowanej zmiennej (charakterystyki, przedziały ufności, wartości krytyczne), co stanowi istotne źródło informacji wykorzystywanej w systemach wspomaganiania decyzji. Identyfikacja trendów i tendencji zmian charakterystyk wywołanych przez zmiany klimatyczne wspomaga prawidłowe zarządzanie zasobami wodnymi w celu zmniejszenia bądź uniknięcia potencjalnych strat społecznych, środowiskowych i ekonomicznych.

Literatura

- Angström, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 50, 121-125.
- Bac, S., Iwański, S. i Kuchar, L. (2008). Porównanie wybranych modeli do szacowania parowania potencjalnego w okresie zimowym dla potrzeb modelowania hydrologicznego. *Acta Agrophysica*, 12(2), 305-314.
- Bac, S. i Rojek, M. (1999). Promieniowanie i bilans cieplny. W S. Bac i M. Rojek (red.), *Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska*. Wrocław: Wyd. AR Wroc.
- Bac, S. i Kuchar, L. (2001). Modyfikacja wzoru Turca dla rejonu Wrocławia. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Ser. Inż. Środ.*, XII (413), 263-270.
- Barrow, E., Hulme, M. i Semenov, M. (1996). Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: Examples from Europe. *Clim. Research*, 7, 195-211.
- Beersma, J.J. i Buishand, T.A. (2003). Multi-site simulation of daily precipitation and temperature conditional on the atmospheric circulation. *Clim. Res.*, 25, 121-133.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F. i Martin, E. (2006). A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111, D23106, doi:10.1029/2005JD006889.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F. i Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int. J. Climatol.*, 27 (12), 1643-1655.
- Buishand, T.A. i Brandsma, T. (1997). Comparison of circulation classification schemes for predicting temperature and precipitation in the Netherlands. *Int. J. Climatol.*, 17, 875-889.
- Buishand, T.A. i Brandsma, T. (2001). Multi-site simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine basin by nearest-neighbor resampling. *Water Resour. Res.*, 37, 2761-2776.
- Burn, D.H. (1994). Hydrological effects of climatic change in west-central Canada. *J. Hydrol.*, 160, 53-70.
- Burton, A., Kilsby, C.G., Fowler, H.J., Cowpertwait, P.S.P. i O'Connell, P.E. (2008). RainSim: a spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environmental Modelling and Software*, 23, 1356-1369.
- Chen, H., Guo, S.L., Xu, C.Y. i Singh, V.P. (2007). Historical temporal trends of hydroclimatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. *J. Hydrol.*, 344, 171-184.
- Chen, H., Xu, C.Y. i Guo, S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *J. Hydrol.*, 434-435, 36-45.
- Covey, C., Achutarao, K.M., Cubasch, U., Jones, P.D., Lambert, S.J., Mann, M.E., Phillips, T.J. i Taylor, K.E. (2003). An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Global and Planetary Change*, 37, 103-133.
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O'Connell, P.E. i Burton, A. (2005). A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of climatic variability and change. *J. Hydrol.* 38, 50-66.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S. i Tebaldi, C. (2007). Review linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547-1578.
- Gates, W.L. (1985). The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem

- impacts of climatic change. *Clim. Change*, 7, 267-284.
- Gleick, P.H. (1987). The development and testing of a water-balance model for climate impact assessment – modeling the Sacramento basin. *Water Resour. Res.*, 23 (6), 1049-1061.
- Gleick, P.H. (1989). Climate change, hydrology, and water resources. *Rev. Geophys.*, 27, 329-344.
- Guo, S.L., Wang, J.X., Xiong, L.H., Ying, A.W. i Li, D.F. (2002). A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China. *J. Hydrol.*, 268 (1-4), 1-15.
- Hayhoe, H.N. (2000). Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates. *Climate Res.*, 14, 75-87.
- Hellström, C., Chen, D., Achberger, C. i Raisanen, J. (2001). Comparison of climate change scenarios for Sweden based on statistical and dynamical downscaling of monthly precipitation. *Clim. Res.*, 19, 45-55.
- Hessami, M., Gachon, P., Ouarda, T.B.M.J. i St-Hilaire, A. (2008). Automated regression-based statistical downscaling tool. *Environ. Model Softw.*, 23, 813-834.
- Huth, R. (2004). Sensitivity of local daily temperature change estimates to the selection of downscaling models and predictors. *J. Clim.*, 17 (3), 640-652.
- Iwański, S. i Kuchar, L. (2003). Generowanie przestrzennych dobowych danych meteorologicznych. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 2 (1), 113-121.
- Jones, R.N., Chiew, F.H.S., Boughton, W.C. i Zhang, L. (2006). Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Advances in Water Resources*, 29, 1419-1429.
- Katz, R.W. (1996). Use of conditional stochastic models to generate climate change scenarios. *Clim. Change*, 35, 397-414.
- Kidson, J.W. i Thompson, C.S. (1998). A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations. *J. Climate*, 11, 735-753.
- Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A. i Wilby, R.L. (2007). A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling and Software*, 22, 1705-1719.
- Kuchar, L. (2004). Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes. *Math. Comput. Symul.*, 65, 69-75.
- Kuchar, L. (2011). Weather Generation with a New Approach to Rainfall Variance Estimation and Seasonal Correlation of Variables for Crop Production Modelling. *Agrophysics*, 1 (4), 40-46.
- Kuchar, L. i Bac, S. (2006). Szacowanie parowania potencjalnego w okresie zimowym za pomocą zmodyfikowanego wzoru Turca dla potrzeb modelowania hydrologicznego. W *Aktualne problemy rolnictwa, gospodarki żywnościowej i ochrony środowiska*. Wrocław: Wyd. AR Wroc., 205-214.
- Kuchar, L., Iwanski, S., Jelonek L. i Szalinska, W. (2014a). Application of Spatial Weather Generator for the Assessment of Climate Change Impacts on a River Runoff. *Geografie*, 119(1), 1-25.
- Kuchar, L., Iwanski, S., Jelonek, L. i Szalinska, W. (2014b). A modeling framework to assess the impact of climate change on a river runoff, *Meteorology Hydrology and Water Management*, 2(2), in print.
- Landman, W.A., Mason, S.J., Tyson, P.D. i Tennant, W.J. (2001). Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow. *J. Hydrol.*, 252, 221-236.
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T. i Prather, M. (2007). Historical Overview of Climate Change. 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., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. i Miller, H.L. (red.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mearns, L.O., Rosezweig, C. i Goldberd, R. (1997). Mean and variance change in climatic scenarios. Methods agricultural applications and measures of uncertainty. *Clim. Change*, 35, 367-396.
- Menzel, L. i Burger, G. (2002). Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology*, 267, 53-64.

- Merritt, W.S., Alila, Y., Barton, M., Taylor, B., Cohen, S. i Neilsen, D. (2006). Hydrologic response to scenarios change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *J. Hydrol.*, 326, 79-108.
- Minville, M., Brissette, F. i Leconte, R. (2008). Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *J. Hydrol.*, 358, 70-83.
- Parlange, M.B. i Katz, R.W. (2000). An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables. *J. Appl. Meteorol.*, 39, 610-622.
- Rajagopalan, B. i Lall, U. (1999). A k-nearest-neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables. *Water Resour. Res.*, 35, 3089-3101.
- Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R.J., Sumi, A. i Taylor, K.E. (2007). 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., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. i Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Richardson, C.W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resour. Res.*, 17 (1), 182-190.
- Schoof, J.T., Pryor, S.C. i Robeson, S.M. (2007). Downscaling daily maximum and minimum temperatures in the Midwestern USA: a hybrid empirical approach. *Int. J. Climatol.*, 27, 439-454.
- Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Lazare, M., Li, J. i Plummer D. (2008). The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmos. Chem. and Phys.*, 8, 7055-7074.
- Semenov M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. i Richardson C.W. (1998). Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climate. *Clim. Res.*, 10, 95-107.
- Semenov, M.A. i Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim. Res.*, 41, 1-14.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A. i Wratt, D. (2007). Technical Summary. 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., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. i Miller, H.L. (red.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wilby, R.L. (1994). Stochastic weather type simulation for regional climate change impact. *Water Resources Research*, 30, 3395-3403.
- Wilby, R.L., Hassan, H. i Hanaki, K. (1998). Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J. Hydrol.*, 205, 1-19.
- Wilby, R.L., Conway, D. i Jones, P.D. (2002a). Prospects for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. *Hydrol. Process*, 16, 1215-1234.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W. i Barrow, E.M. (2002b). SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ. Model Softw.*, 17, 147-159.
- Wilks, D.S. (1992). Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Clim. Change*, 22, 67-84.
- Wilks, D.S. (1998). Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *J. Hydrol.*, 210, 178-191.
- Xu, C.Y., Widen, E. i Halldin, S. (2005). Modeling hydrological consequences of climate change – progress and challenges. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (6), 789-797.
- Zorita, E. i Storch von, H. (1999). The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *J. Clim.*, 12(8), 2474-2489.

Streszczenie

Zastosowanie danych syntetycznych do badania wpływu zmian klimatu na zasoby wodne zlewni. Modele hydrologiczne opad-odpływ czy rolnicze opad-plon wymagają na wejściu określony zbiór danych meteorologicznych. Problem braku takich danych bądź ich niekompletność mogą zostać rozwiązane przez uzyskanie danych syntetycznych. Jest to konieczne w badaniach nad wpływem zmian klimatu, gdzie do badań wykorzystuje się dane wygenerowane za pomocą modeli symulujących potencjalne wartości wybranych zmiennych meteorologicznych. W pracy przedstawiono proces przygotowania syntetycznych danych do modelu opad-odpływ dla aktualnych warunków klimatycznych oraz spełniających założenia scenariuszy zmiany klimatu. Przeprowadzono weryfikację uzyskanych danych generowanych. Dane zostały wykorzystane do przeprowadzenia oceny wpływ zmian klimatycznych na 2080 rok według scenariusza emisyjnego A1B oraz modelu cyrkulacyjnego HadCM3.

Summary

Application of synthetic data for assessment of climate change impact on water resources of basin. Hydrological rainfall-runoff models and agricultural rainfall-yield

need at input a specific set of meteorological data. The problem of the absence of such data or their incompleteness can be solved by synthetic data. This is necessary in studies on the effects of climate change, where the research uses data from weather generator that simulate the possible values of selected meteorological variables. The paper presents the process of preparing synthetic data for rainfall-runoff model for current climatic conditions and satisfying the assumptions of climate change scenarios. A verification of the generated data was also presented. The obtained data were used to assess the impact of climate change on the year 2080 according to the emission scenario A1B and circulation model HadCM3.

Authors' addresses:

Leszek Kuchar, Sławomir Iwański
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Katedra Matematyki
ul. C.K. Norwida 25/27, 50-375 Wrocław
Poland
e-mail: leszek.kuchar@up.wroc.pl
slawomir.iwanski@up.wroc.pl

Leszek Jelonek, Wiwiana Szalińska
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Oddział we Wrocławiu
ul. Parkowa 30, 51-616 Wrocław
Poland
e-mail: leszek.jelonek@imgw.pl
szalinska@imgw.pl