

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 27.03.2012 r.
Zaakceptowano 04.05.2012 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

MODELOWANIE PRZEPIYWÓW W RZECE KACZAWA W PERSPEKTYWIE LAT 2030 i 2050 (PÓLROCZE LETNIE)

**Leszek KUCHAR¹⁾ ABCDEF, Sławomir IWAŃSKI¹⁾ BCE,
Leszek JELONEK²⁾ ABDF, Wiwiana SZALIŃSKA²⁾ BCDF**

¹⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki

²⁾ Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział we Wrocławiu

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wpływ potencjalnych zmian klimatu na odpływ w zlewni Kaczawy w perspektywie lat 2030 i 2050 dla półrocza letniego. Odpływ dla badanych okresów obliczono z wykorzystaniem modelu opad–odpływ NAM. Dane meteorologiczne wymagane przez model NAM zostały wygenerowane za pomocą modelu SWGEN, którego kalibrację przeprowadzono na podstawie dobowych danych z lat 1981–2000, obejmujących obserwacje maksymalnej, minimalnej, średniej temperatury powietrza, wartości opadu atmosferycznego i usłonecznienia. Wartości promieniowania całkowitego oszacowano za pomocą wzoru Blacka. Brakujące charakterystyki zbiorcze zostały interpolowane na podstawie istniejących danych. Symulacje przeprowadzono dla aktualnych warunków klimatycznych oraz trzech wybranych scenariuszy: GISS, CCCM oraz GFDL. Wartości parowania potencjalnego oszacowano, wykorzystując zmodyfikowany wzór Turca. Zmiany odpływu obrazowano rozkładami prawdopodobieństwa i charakterystykami opisowymi. Symulacje umożliwiły określenie potencjalnych zmian średniego dobowego odpływu Kaczawy na wodowskazię Piątница. Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono wzrost prawdopodobieństwa wstąpienia przepływów ekstremalnych.

Słowa kluczowe: generowanie danych meteorologicznych, model opad–odpływ, scenariusze zmiany klimatu

WSTĘP

Zmiany klimatyczne, obserwowane od połowy lat siedemdziesiątych XX w., zapoczątkowały niezwykle intensywny rozwój badań naukowych. Pierwsze, fundamentalne pytanie to – czy rzeczywiście takie zmiany następują, a jeśli tak – co jest ich przyczyną. Drugi problem stawiany przez naukę to, czy i w jakim stopniu potencjalne zmiany klimatu wpłyną na środowisko oraz jakie wymuszą procesy adaptacyjne dla przewidywanych zmian w zależności od scenariuszy [MACDONALD, SERTORIA 1991; ROZENZWEIG 1989; SOLOMON i in. 2007]. Postęp technologiczny w dziedzinie maszyn cyfrowych, aparatury badawczej, jak również rozwój metod matematycznych umożliwił udowodnienie stawianych hipotez [COVEY i in. 2003; GLEICK 1989; HOUGHTON i in. 1996; PARRY i in. 2007; SOLOMON i in. 2007].

Na szczególne zainteresowanie zasługuje rozwój metod, umożliwiający różne projekcje i prognozy, towarzyszące efektom zmian klimatu [BARROW i in. 1996; KATZ 1996; KIDSON, THOMPSON 1998; LALL, SHARMA 1996; WILBY 1994]. Stosowane wcześniej i znane w matematyce metody ekstrapolacyjne, umożliwiające prognozowanie z horyzontem czasowym do roku 2050 (aktualnie do roku 2100), nie zdawały egzaminu ze względu na: charakter konstrukcji, tj. zbyt długi horyzont prognozy i związane z tym błędy, założenie o stałym kształcie zjawiska i zbyt szerokie prognozy przedziałowe – o ile można by było je określić [WALPOLE, MYERS 1993; WILKS 2006]. Budowane powszechnie modele matematyczne, wykorzystujące dane meteorologiczne, umożliwiały opisywanie badanego zjawiska jedynie w warunkach aktualnych. W przypadku przyszłych warunków klimatycznych najpierw należy stworzyć właściwe dane, które następnie mogą być wykorzystane przez odpowiednie modele. Dlatego na początku lat osiemdziesiątych XX w. pojawiły się narzędzia, umożliwiające tworzenie syntetycznych ciągów danych meteorologicznych, których rozkłady prawdopodobieństwa były zgodne z rozkładami, uzyskiwanymi dla danych klimatycznych (Weather Generator). Umożliwiły one ocenę wpływu klimatu na badane zjawisko [ADAMOWSKY, SMITH 1972; ALLEN, HAAN 1975; BRUHN i in. 1980; HAYHOE 2000; JOHNSON i in. 1996; KUCHAR 2004; PARLANGE, KATZ 2000; RICHARDSON 1981; SEMENOV i in. 1998; SRIKANTHAN, MCMAHON 2001; THORNTON i in. 1997]. Zmienne generowane w modelach dotyczyły promieniowania, temperatury i opadów w okresach dobowych dla pojedynczej stacji i były wykorzystywane do badania efektów zmian klimatycznych między innymi w rolnictwie i hydrologii. Z uwagi na rozszerzanie badań na coraz większe obszary podjęto prace nad modelami przestrzennymi, umożliwiającymi tworzenie ciągów danych opadu atmosferycznego i temperatury równocześnie dla wielu stacji, zachowującymi zależności między zmiennymi meteorologicznymi, pochodzącymi z różnych stacji [BEERSMA, BUIHAND 2003; BUIHAND, BRANDSMA 2001; FOWLER i in. 2005; RAJAGOPALAN, LALL 1999; WILBY i in. 2002; WILKS 1998; WILLEMS 2001]. Dane przestrzenne wykorzystywano głównie do

symulacji odpływów w sytuacjach ekstremalnych, a także do ilustracji zmian w kontekście rozważanych scenariuszy klimatycznych [BURN 1994; JONES i in. 2006; LANDMAN i in. 2001; MERRITT i in. 2006; MINVILLE 2000].

W niniejszej pracy przedstawiono efekty zastosowania modelu, generującego przestrzenne dane meteorologiczne, metod interpolacyjnych, wybranych scenariuszy zmian klimatu oraz modelu opad–odpływ do oszacowania potencjalnych zmian odpływów w zlewni rzeki Kaczawa w półroczu letnim dla okresu 2030–2050.

OBSZAR BADAŃ

Zlewnia Kaczawy – lewostronnego dopływu Odry w jej środkowym biegu (rys. 1) – ma powierzchnię 2261,3 km², całkowita długość rzeki wynosi 83,9 km. Kaczawa wypływa z Gór Kaczawskich, znajdujących się w południowej części zlewni. Rozpoczyna swój bieg na wysokości ok. 550 m n.p.m. i ma kilka dopływów o zróżnicowanym reżimie hydrologicznym. Prawostronne dopływy główne to: Nysa Szalona i Wierzbiak. Dopływ lewostronny to Czarna Woda, do której uchodzi Skora. Odpływ ze zlewni Kaczawy kształtowany jest – poza czynnikami naturalnymi – przez wielozadaniowy zbiornik Słup, zlokalizowany na Nysie Szalonej oraz zbiorniki przeciwpowodziowe Świerzawa na Kamienniku i Bolków na Rachowickiej Wodzie. Mają one znaczenie lokalne i nie wpływają istotnie na bilans wodny Kaczawy. Około 26% powierzchni zlewni zajmują lasy, a ponad 60% tereny uprawne.



Rys. 1. Lokalizacja zlewni Kaczawy; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Location map of the Kaczawa River basin; source: own elaboration

Do badań wybrano stacje z sieci pomiarowo-obszaryjnej Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW, znajdujące się zarówno na obszarze zlewni, jak i w jej otoczeniu. Obejmują one stacje meteorologiczne oraz stacje hydrologiczne (tab. 1). W zlewni znajduje się, obejmująca większość jej powierzchni, stacja hydrologiczna w Piątnicy, dla której istnieje wieloletni ciąg zweryfikowanych obserwacji hydrologicznych.

Tabela 1. Stacje z dobowymi obserwacjami zmiennych meteorologicznych

Table 1. Sites with available daily observations

Miejscowość Site name	Typ stacji Type of station	Położenie geograficzne Location		Dostępne dane Available data						
		długość longitude	szerokość latitude	SR	U_s	T_{min}	T_{sr}	T_{max}	P	
Bolków	O	16°06'E	50°55'N							x
Chocianów	O	15°55'E	51°25'N							x
Chojnów	O	15°56'E	51°17'N							x
Chwałkowie	O	16°37'E	51°27'N			x	x	x		
Dobromierz	O	16°15'E	50°55'N							x
Iwiny	O	15°42'E	51°12'N							x
Jawor	O	16°11'E	51°03'N							x
Jelenia Góra	S	15°48'E	50°54'N		x	x	x	x		
Kaczorów	O	15°58'E	50°55'N							x
Legnica	S	16°12'E	51°12'N	x	x	x	x	x	x	x
Leszno	S	16°32'E	51°50'N		x	x	x	x		
Lubin	O	16°12'E	51°24'N							x
Polkowice Dolne	O	16°03'E	51°30'N			x	x	x		
Pszemno	K	16°33'E	50°51'N			x	x	x		
Stanisławów	O	16°01'E	51°04'N							x
Strzegom	O	16°21'E	50°58'N							x
Tomaszów Górny	K	15°41'E	51°17'N			x	x	x	x	x
Twardocice	O	15°45'E	51°06'N							x
Wojcieszów Dolny	O	15°55'E	50°59'N							x
Wrocław	S	16°53'E	51°06'N		x	x	x	x		
Zagrodno	O	15°52'E	51°12'N							x
Zgorzelec	K	15°02'E	51°08'N			x	x	x		
Zielona Góra	S	15°32'E	51°56'N		x	x	x	x		
Złotoryja	O	15°56'E	51°07'N							x

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

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

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Dane dobowe, uzyskane ze stacji meteorologicznych, obejmowały opad atmosferyczny za okres 1981–2000. Obserwacje maksymalnej, minimalnej i średniej temperatury powietrza oraz usłonecznienia z tego okresu były dostępne dla dwóch stacji (Legnica i Tomaszów Górny), przy czym dla stacji Legnica dysponowano także wartościami promieniowania słonecznego. Dla posterunków, w których nie prowadzono obserwacji promieniowania całkowitego i temperatury, ich wartości interpolowano na podstawie danych ze stacji w Legnicy, Tomaszowie Górnym oraz w 8 dodatkowych stacjach regionu.

W przypadku czterech stacji (Jelenia Góra, Leszno, Wrocław, Zielona Góra) wartości promieniowania całkowitego oszacowano na podstawie usłonecznienia, za pomocą wzoru Blacka [ANGSTRÖM 1924; BAC, ROJEK 1999]:

$$SR = SR_0 \left(0,18 + 0,62 \frac{US}{US_0} \right) \quad (1)$$

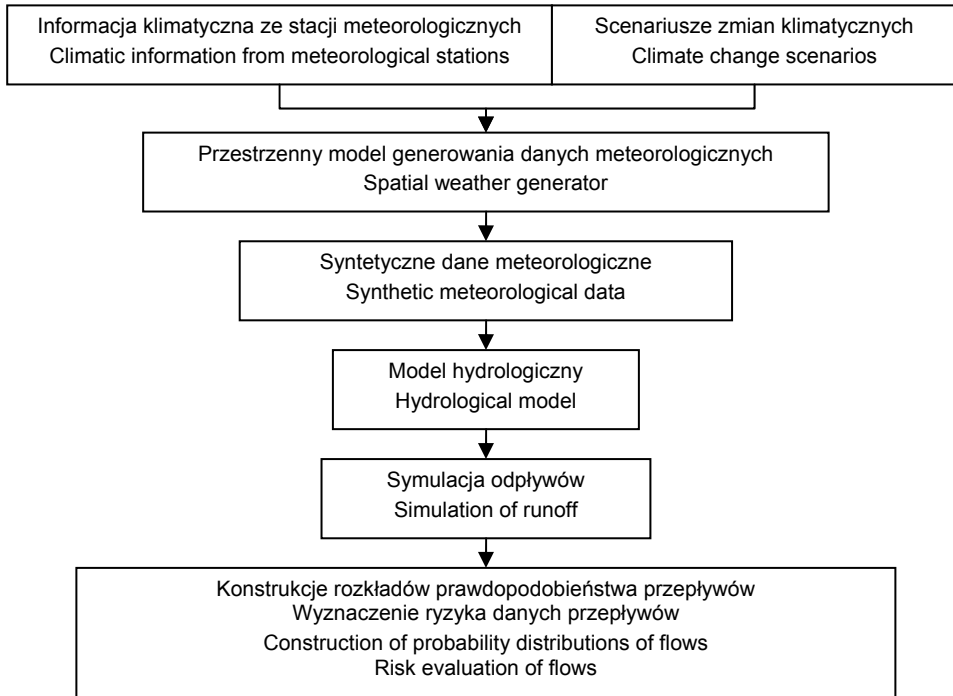
gdzie:

- SR – promieniowanie całkowite, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;
- SR_0 – promieniowanie słoneczne w górnej granicy atmosfery, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;
- US – usłonecznienie rzeczywiste, h;
- US_0 – usłonecznienie możliwe (astronomiczna długość dnia), h.

METODY BADAŃ

Ideę symulacji odpływów ze zlewni Kaczawy dla warunków klimatycznych prognozowanych przez wybrane scenariusze zmian klimatu przedstawiono na rysunku 2. Dla obszaru zlewni generowano w pierwszym etapie dobowe dane meteorologiczne, które wykorzystano do modelu hydrologicznego typu opad–odpływ. Dane generowano, wykorzystując aktualną, zbiorczą charakterystykę klimatyczną, uzyskaną z 20-letnich danych (tło dla zmian klimatycznych), oraz charakterystykę klimatyczną, zmodyfikowaną o informacje pochodzące z trzech scenariuszy zmian klimatu: GISS, GFDL, CCCM [MEARNS i in. 1997]. Zmiany charakterystyk klimatycznych prognozowanych według poszczególnych scenariuszy przedstawiono w tabeli 2.

Do uzupełniania zestawu charakterystyk zbiorczych, potrzebnych do kalibracji przestrzennego modelu generującego dobowe dane meteorologiczne, wykorzystano metody interpolacyjne. W przypadku temperatury brakujące parametry (wartość średnia i odchylenie standardowe dla poszczególnych miesięcy) dla 14 stacji szacowano na podstawie danych, pochodzących z 10 stacji (2 znajdujących się na terenie zlewni i 8 w rejonie południowo-zachodniej Polski). Wartości parametrów promieniowania słonecznego dla 15 stacji oszacowano na podstawie danych po-



Rys. 2. Schemat symulacji odpływów w zlewni z wykorzystaniem generowanych danych meteorologicznych i scenariuszy zmian klimatu; źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Diagram of catchment runoff simulation using generated weather data and climate change scenarios; source: own elaboration

chodzących z 5 stacji, z których jedna jest położona w zlewni, a 4 w jej sąsiedztwie.

Sposób interpolacji wybierano na podstawie porównania metody odwrotnej odległości oraz Ordinary Kriging techniką Cross-Validation. Dla każdego miesiąca przeprowadzono serię obliczeń, polegającą na wyciąganiu ze zbioru kolejno po jednej stacji, a następnie oszacowaniu poszukiwanych parametrów rozpatrywanymi metodami interpolacyjnymi na podstawie danych z pozostałych stacji. Uzyskane w ten sposób dla każdej stacji błędy posłużyły do wybrania odpowiedniej metody interpolacji.

Wymagane do modelu hydrologicznego wartości parowania potencjalnego oszacowano, wykorzystując zmodyfikowany wzór Turca, umożliwiający uzmiennienie stałych oraz dodanie wyrazu stałego [BAC, KUCHAR 2001a, b; KUCHAR, BAC 2006]:

$$E_p = a_0 + a_1 T_{sr} \frac{a_2 SR + a_3}{T_{sr} + a_4} \quad (2)$$

Tabela 2. Charakterystyka zmian klimatu na lata 2030 i 2050 według wybranych scenariuszy**Table 2.** Characteristics of climate change for the year 2030 and 2050 based on selected scenarios

Zmienna Variable	Parametr Parameter	Okres Period	Zmiana według modelu Change according to model		
			GISS	CCCM	GFDL
Rok 2030 Year 2030					
Temperatura Temperature	średnia mean	zima winter lato summer	+0,9°C +0,7°C	+0,8°C +0,6°C	+0,9°C +0,6°C
	odchylenie standardowe standard deviation	rok year	+3%	+2%	+2%
	<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>				
Opad Precipitation	średnia mean	zima winter lato summer	+4% 0%	+5% -3%	+10% -8%
	odchylenie standardowe standard deviation	rok year	+4%	+2%	+10%
	<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>				
Rok 2050 Year 2050					
Temperatura Temperature	średnia mean	zima winter lato summer	+2,8°C +2,0°C	+2,4°C +1,9°C	+2,6°C +2,3°C
	odchylenie standardowe standard deviation	rok year	+9%	+6%	+6%
	<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>				
Opad Precipitation	średnia mean	zima winter lato summer	+12% 0%	14% -9%	+30% -24%
	odchylenie standardowe standard deviation	rok year	+12%	+6%	+30%

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych MACDONALD, SERTORIO [1991].

Source: own elaboration based on data acc. to MACDONALD, SERTORIO [1991].

gdzie:

a_i – parametry modelu;

E_p – parowanie potencjalne, mm;

T_{sr} – średnia temperatura powietrza, °C;

SR – suma promieniowania całkowitego; $W \cdot m^{-2}$;

Wszystkie wielkości mierzono w okresach miesięcznych.

Model SWGEN. Do generowania przestrzennych, dobowych danych meteorologicznych wykorzystano model SWGEN [IWAŃSKI, KUCHAR 2003], oparty na jednopunktowym modelu WGEN [RICHARDSON 1981] wraz z modyfikacjami [KUCHAR 1999]. W wybranym modelu generowanie danych przebiega dwuetapowo.

W pierwszej kolejności symulowano dobowe opady w następujący sposób: określano stan dnia (dzień z opadem i dzień bez opadu) z wykorzystaniem dwustanowego łańcucha Markowa pierwszego rzędu. Dla każdej stacji i każdego miesiąca $m = 1, 2, \dots, 12$ estymowano prawdopodobieństwa przejścia $P_m(W|W)$, $P_m(W|D)$, $P_m(D|W)$, $P_m(D|D)$, gdzie W i D oznaczają odpowiednio dzień z opadem i dzień bez opadu.

Następnie generowano wartość opadu za pomocą rozkładu gamma $\Gamma_m(\alpha_1, \beta_1), \dots, \Gamma_m(\alpha_k, \beta_k)$, gdzie $m = 1, \dots, 12$, a k – liczba stacji. W przypadku, gdy otrzymano dzień bez opadu dla i -tej stacji, przyjmowano $\Gamma_m(\alpha_i, \beta_i) = 0$. Prawdopodobieństwa przejścia oraz parametry rozkładów szacowano dla każdej stacji i każdego miesiąca.

W drugim etapie generowano wartości maksymalne, minimalne i średnie temperatury oraz wartości promieniowania całkowitego za pomocą wielowymiarowego szeregu czasowego AR(1):

$$X_t = \Phi_m X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (3)$$

gdzie:

- X_t, X_{t-1} – wektory kolumnowe standaryzowanych wartości temperatury maksymalnej, minimalnej i średniej oraz promieniowania całkowitego wszystkich stacji odpowiednio w dniu t i $t-1$;
- ε_t – błędy o wartości oczekiwanej równej zero i macierzy kowariancji Σ_m ;
- Φ_m – macierz parametrów, gdzie $m = 1, \dots, 12$.

Model NAM. Jest to model hydrologiczny, symulujący proces transformacji opadu w odpływ dla pojedynczej zlewni. Model stanowi moduł systemu hydrologicznego Mike11, który może być wykorzystywany samodzielnie dla pojedynczej zlewni, grupy zlewni lub jako część struktury, złożonej ze zlewni i odcinków rzek. Nazwa modelu jest skrótem duńskiego zwrotu „Nedbør–Afstrømnings–Model”, oznaczającego „opad–odpływ–model”. Jest to model deterministyczny, konceptualny o parametrach skupionych.

Model opisuje, w uproszczonej ilościowej formie, proces cyklu hydrologicznego w zlewni. Uwzględnia różne komponenty procesu transformacji opadu w odpływ, które są reprezentowane przez bilans zawartości wody w czterech wzajemnie powiązanych zbiornikach: śniegowym, powierzchniowym, strefy korzeniowej, wód gruntowych. Każdy zbiornik reprezentuje inne fizyczne elementy zlewni. Model NAM może być używany do ciągłego modelowania przepływów w długich okresach lub do symulowania pojedynczych epizodów [NIELSEN, HANSEN 1973].

NAM symuluje transformację opadu w odpływ na podstawie pojedynczego szeregu czasowego średnich ważonych wartości opadu i temperatury na posterunkach pomiarowych. Podobnie parowanie potencjalne, jeżeli zostało obliczone dla pojedynczych punktów, zostaje przeliczone na wartości średnie ważone dla zlewni.

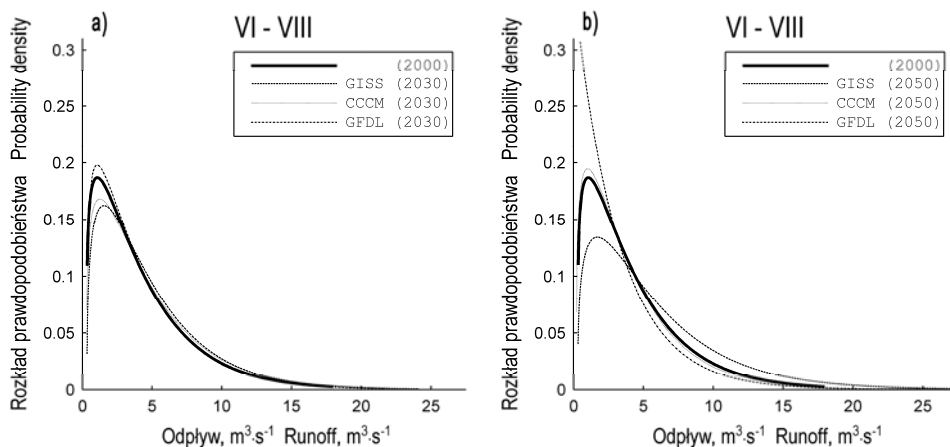
WYNIKI BADAŃ

Zastosowanie metod interpolacyjnych umożliwiło uzupełnienie wartości brakujących w poszczególnych stacjach, co z kolei pozwoliło na wykorzystanie przestrzennego generatora dobowych danych meteorologicznych do symulowania po-

tencjalnych wartości danych meteorologicznych w zmienionych warunkach klimatycznych.

W rezultacie utworzono 500-letnie ciągi danych, odzwierciedlające potencjalne przebiegi wartości wybranych zmiennych meteorologicznych w określonych warunkach klimatycznych dla zadanego horyzontu czasowego. Dane te, wprowadzone do modelu hydrologicznego, umożliwiły symulowanie odpływów ze zlewni dla warunków aktualnych i otrzymanych według wybranych scenariuszy klimatycznych. Identyfikacje parametrów modelu NAM dla zlewni Kaczawy przeprowadzono na podstawie danych meteorologicznych dla sieci posterunków oraz przepływów dla posterunku wodowskazowego Piątница dla lat 1981–2000.

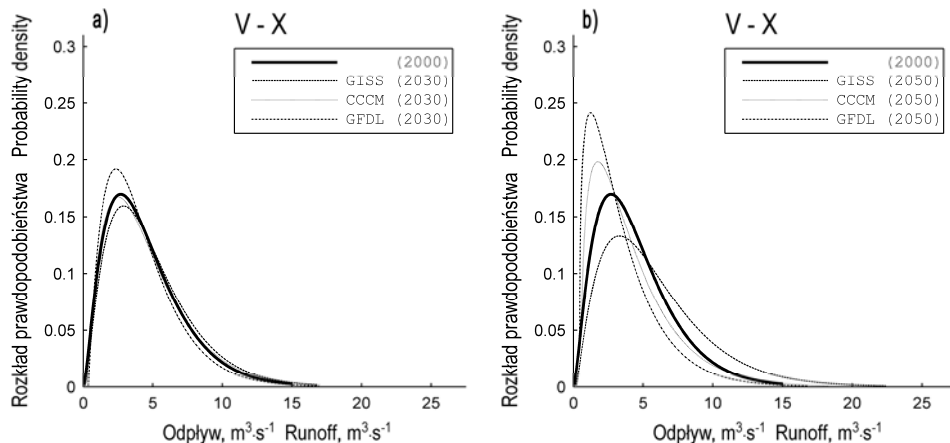
Uzyskane wartości odpływów dobowych w punkcie zamykającym zlewnię do przekroju wodowskazowego w Piątнице umożliwiły konstrukcję rozkładów prawdopodobieństwa (rys. 3, 4) oraz wyznaczenie ryzyka wystąpienia danych odpływów.



Rys. 3. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa średniego dobowego odpływu rzeki Kaczawa na wodowskazie w Piątнице dla okresu czerwiec–sierpień oszacowane dla warunków aktualnych (2000) oraz poszczególnych scenariuszy zmian klimatu: a) dla roku 2030, b) dla roku 2050; GISS, CCCM, GFDL – scenariusze zmian klimatu, jak w tabeli 2.; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Probability density functions of the average daily runoff at the gauge Piątница of the Kaczawa River for the period June–August developed for current conditions (2000) and selected climate change scenarios: a) for the year of 2030, b) for the year 2050; GISS, CCCM, GFDL – climate change scenarios, like in table 2; source: own studies

Przyszłe odpływy w zlewni rzeki Kaczawa zależą od ogólnych zmian temperatury i opadu atmosferycznego przyjętych w scenariuszach zmian klimatu. Dla rozpatrywanego okresu czerwiec–sierpień (tab. 3) wartość średnia dobowego odpływu według scenariusza GISS do roku 2050 zwiększy się o 32% (o 10% do roku 2030), a jego odchylenie standardowe o 38% (o 10% do roku 2030). W scenariuszu GFDL



Rys. 4. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa średniego dobowego odpływu rzeki Kaczawa na wodowskaziu w Piątnicy dla okresu maj–październik, oszacowane dla warunków aktualnych (2000) oraz poszczególnych scenariuszy zmian klimatu: a) dla roku 2030, b) dla roku 2050; GISS, CCCM, GFDL – scenariusze zmian klimatu, jak w tabeli 2.; źródło: wyniki własne

Fig. 4. Probability density functions of the average daily runoff at the gauge Piątница of the Kaczawa river for the period May–October developed for current conditions (2000) and selected climate change scenarios a) for the year of 2030, b) for the year 2050 GISS, CCCM, GFDL – climate change scenarios, like in Table 2; source: own studies

Tabela 3. Charakterystyki średniego dobowego odpływu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) rzeki Kaczawa na wodowskaziu w Piątnicy w okresie czerwiec–sierpień, oszacowane dla warunków aktualnych (2000) oraz poszczególnych scenariuszy zmian klimatu dla roku 2030 i 2050

Table 3. Characteristics of the average daily runoff ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) at the gauge Piątница of the Kaczawa River for the period June–August developed for current conditions (2000) and selected climate change scenarios for the year of 2030 and 2050

Scenariusz Scenario	Wartość średnia Mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Kwantyl Quantile					
			0,001	0,01	0,05	0,95	0,99	0,999
(2000)	4,4	3,4	0,3	0,4	0,6	11,2	15,6	17,2
GISS (2030)	4,9	3,7	0,4	0,4	0,8	11,5	16,3	19,7
CCCM (2030)	4,8	3,9	0,3	0,4	0,6	12,2	19,1	21,2
GFDL (2030)	4,4	3,5	0,4	0,5	0,7	11,0	16,9	19,0
GISS (2050)	5,8	4,7	0,3	0,5	0,8	14,5	19,5	25,9
CCCM (2050)	4,1	3,8	0,2	0,4	0,7	12,3	18,2	19,6
GFDL (2050)	3,7	3,4	0,5	0,5	0,7	10,0	15,6	19,9

Objaśnienia: GISS, CCCM, GFDL – scenariusze zmian klimatu, jak w tabeli 2.

Explanations: GISS, CCCM, GFDL – climate change scenario, as in table 2.

Źródło: wyniki własne. Source: own studies

przewidywane jest zmniejszenie wartości średniej o 17% do roku 2050 (o 1% do roku 2030) i wzrost odchylenia standardowego o 1% do roku 2050 (o 4% do roku 2030). Scenariusz CCCM zakłada w perspektywie do roku 2050 spadek wartości średniej o 7% oraz wzrost odchylenia standardowego o 13%.

Wszystkie scenariusze przewidują zmiany w wartościach ekstremalnych. Wartość kwantyla 95% ulegnie zmianie do roku 2050 odpowiednio o 30, 10 i -10% według scenariuszy GISS, CCCM i GFDL. W przypadku kwantyla 5% wszystkie scenariusze zakładają zwiększenie od 18% (wg GFDL) do 44% (wg GISS).

W przypadku III i IV kwartału roku hydrologicznego, tj. okresu maj–październik wartość średnia dobowego odpływu według scenariusza GISS do roku 2050 zwiększy się o 29% (o 8% do roku 2030), a jego odchylenie standardowe o 33% (o 8% do roku 2030) – tabela 4. W przypadku scenariusza GFDL przewidywane jest zmniejszenie zarówno wartości średniej, o 23% do roku 2050 (o 7% do roku 2030), jak i odchylenia standardowego, o 1% do roku 2050 (o 5% do roku 2030). Scenariusz CCCM zakłada w perspektywie do roku 2050 zmniejszenie wartości średniej o 7% i zwiększenie odchylenia standardowego o 9%.

Tabela 4. Charakterystyki średniego dobowego odpływu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) rzeki Kaczawa na wodowskaziu w Piątnicy w okresie maj–październik, oszacowane dla warunków aktualnych (2000) oraz poszczególnych scenariuszy zmian klimatu dla roku 2030 i 2050

Table 4. Characteristics of the average daily runoff ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) at the gauge Piątница of the Kaczawa River for the period May–October developed for current conditions (2000) and selected climate change scenarios for the year of 2030 and 2050

Scenariusz Scenario	Wartość średnia Mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Kwantyl Quantile					
			0,001	0,01	0,05	0,95	0,99	0,999
(2000)	4,5	2,7	0,4	0,5	0,8	9,8	13,0	14,0
GISS (2030)	4,9	3,0	0,4	0,5	1,1	10,5	12,7	16,6
CCCM (2030)	4,7	3,1	0,4	0,6	0,9	10,6	14,5	15,3
GFDL (2030)	4,2	2,7	0,5	0,7	1,1	9,2	11,5	17,0
GISS (2050)	5,8	3,6	0,5	0,7	1,1	12,6	15,9	21,2
CCCM (2050)	4,2	3,0	0,6	0,7	1,0	10,7	12,5	16,1
GFDL (2050)	3,5	2,6	0,5	0,5	0,7	8,4	11,3	14,9

Objaśnienia: GISS, CCCM, GFDL – scenariusze zmian klimatu, jak w tabeli 2.

Explanations: GISS, CCCM, GFDL – climate change scenario, like in table 2.

Źródło: wyniki własne. Source: own studies

Wartość kwantyla 5% według scenariuszy GISS i CCCM do roku 2050 zwiększy się odpowiednio o 29 i 18%, a zgodnie ze scenariuszem GFDL zmniejszy się o 15%. Kwantyl 95% ulegnie zmianie w analogiczny sposób – zwiększy się według GISS i CCCM do roku 2050 odpowiednio o 29 i 10%, a według GFDL zmaleje o 14%.

Różnice potencjalnych zmian odpływu wynikają z odmiennych założeń, przyjętych w poszczególnych scenariuszach zmian klimatu. Według scenariusza GISS, zarówno w krótszym (do 2030 roku), jak i dłuższym (do 2050 roku) horyzoncie czasowym wartość średnia i odchylenie standardowe średniego odpływu dobowego ulegną zmianie w największym stopniu. Scenariusz ten zakłada największy wśród rozpatrywanych scenariuszy wzrost zmienności opadów i brak zmiany ich wartości w okresie letnim, a jednocześnie przyjmuje umiarkowany wzrost temperatury zarówno pod względem wartości średniej, jak i odchylenia standardowego. Pozostałe scenariusze (CCCM i GFDL) zakładają stopniowe zmniejszanie opadów z równoczesnym wzrostem ich zmienności. Dlatego prognozowane według nich zmiany charakteryzują się mniejszą dynamiką, a w niektórych przypadkach także odmienną tendencją.

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników można przyjąć, że w wyniku zmian zakładanych przez analizowane scenariusze zmian klimatu nastąpi wzrost prawdopodobieństwa ekstremalnych wartości odpływów. W dalszym horyzoncie czasowym wraz ze wzrostem temperatury i zmniejszeniem opadów należy spodziewać się zmniejszenia wartości średniej odpływów.

Zwiększenie wartości średniej odpływu, a jednocześnie brak zmian lub zmniejszenie wartości średniej opadu może być spowodowane tym, że parowanie potencjalne, które zwiększa się wraz z temperaturą, ma wpływ na bilans wodny tylko wówczas, gdy nie występuje opad (model NAM zakłada, że wówczas ewapotranspiracja wynosi zero) i wtedy, gdy występuje woda w strefie powierzchniowej i w strefie korzeniowej roślin. Jednocześnie w warunkach opadów o mniejszej intensywności zwiększa się stosunek infiltracji (ta część wody nie odparowuje) w stosunku do odpływu powierzchniowego. Zatem spodziewane zwiększenie parowania potencjalnego w przyjętym modelu nie musi wprost redukować odpływu.

Oczywiście, należy brać pod uwagę również pewne błędy, związane z szacowaniem parowania, ale zastosowanie bardziej złożonych metod szacowania parowania wymagałoby predykcji większej liczby parametrów meteorologicznych, takich jak prędkość wiatru, zachmurzenie i niedosyt wilgotności powietrza, których zmiany – tak jak promieniowanie – nie są uwzględniane w scenariuszach zmian klimatu. Inny czynnik, który może wpływać na taką sytuację – to znaczny wzrost zmienności opadów.

Zastosowanie przestrzennego generatora SWGEN w połączeniu z modelem hydrologicznym opad–odpływ NAM oraz scenariuszy zmian klimatu umożliwia badanie potencjalnych zmian, zachodzących w gospodarce wodnej na obszarze zlewni w perspektywie 20–40 lat. Otrzymane rozkłady prawdopodobieństwa dają pełną informację na temat charakterystyki momentu, przedziałów ufności i warto-

ści krytycznych, które są istotnym źródłem informacji, wykorzystywanej w systemach wspomagania decyzji.

LITERATURA

- ADAMOWSKY K., SMITH A.F. 1972. Stochastic generation of rainfall. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 98 s. 1935–1945.
- ALLEN D.M., HAAN C.T. 1975. Stochastic simulation of daily rainfall. Research Report. No. 82. Lexington Kentucky Univ., Water Resources Inst. ss 112.
- ANGSTRÖM A. 1924. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 50 s. 121–125.
- BARROW E., HULME M., SEMENOV M. 1996. Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: Examples from Europe. *Climate Research*. Vol. 7 s. 195–211.
- BAC S., ROJEK M. 1999. *Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska*. Wrocław. Wydaw. AR. ISBN 83-87866-66-0 ss. 314.
- BAC S., KUCHAR L. 2001a. Modyfikacja wzoru do obliczania wielkości parowania potencjalnego według Turca. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin-Polonia. Sectio B*. Vol. 55/56. No. 5 s. 42–49.
- BAC S., KUCHAR L. 2001b. Modyfikacja wzoru Turca dla rejonu Wrocławia. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu. Ser. Inż. Środ. T. 12. Z. 413 s. 263–270*.
- BEERSMA J.J., BUISSHAND T.A. 2003. Multi-site simulation of daily precipitation and temperature conditional on the atmospheric circulation. *Climate Research*. Vol. 25 s. 121–133.
- BRUHN J.A., FRY W.E., FICK G.W. 1980. Simulation of daily weather data using theoretical probability distributions. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 19. No. 9 s. 1029–1036.
- BUISSHAND T.A., BRANDSMA T. 2001. Multisite simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine basin by nearest-neighbor resampling. *Water Resources Research*. Vol. 37. No. 11 s. 2761–2776.
- BURN D.H. 1994. Hydrological effects of climatic change in west-central Canada. *Journal of Hydrology*. Vol. 160 s. 53–70.
- COVEY C., ACHUTARAO K.M., CUBASCH U., JONES P.D., LAMBERT S.J., MANN M.E., PHILLIPS T.J., TAYLOR K.E. 2003. An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Global and Planetary Change*. Vol. 3. s. 103–133.
- FOWLER H.J., KILSBY C.G., O'CONNEL P.E., BURTON A. 2005. A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of climatic variability and change. *Journal of Hydrology*. Vol. 308 s. 50–66.
- GLEICK P.H. 1989. Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics*. Vol. 27 s. 329–344.
- HAYHOE H.N. 2000. Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates. *Climate Research*. Vol. 14 s. 75–87.
- HOUGHTON J.T., MEIRO F.L.G., CALLANDAR B.A., HARRIS N., KATTENBERG A., MASKELL K. (red.) 1996. *Climate change 1995. The science of climate change*. Cambridge. Cambridge University Press. ISBN 978-05215644335 ss. 584.
- IWAŃSKI S., KUCHAR L. 2003. Generowanie przestrzennych dobowych danych meteorologicznych. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*. Vol. 2. No. 1 s. 113–121.
- JOHNSON G.L., HANSON C.L., HARDEGREE S.P., BALLARD E.B. 1996. Stochastic weather simulation: Overview and analysis of two commonly used models. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 35 s. 1878–1896.

- JONES R.N., CHIEW F.H.S., BOUGHTON W.C., ZHANG L. 2006. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Advances in Water Resources*. Vol. 29. s. 1419–1429.
- KATZ R.W. 1996. Use of conditional stochastic models to generate climate change scenarios. *Climate Change*. Vol. 35. s. 397–414.
- KIDSON J.W., THOMPSON C.S. 1998. A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations. *Journal of Climate*. Vol. 11 s. 735–753.
- KUCHAR L. 1999. Generowanie dobowych ciągów danych meteorologicznych dla określonych scenariuszy zmian klimatu. *Folia Universitatis Agriculture Stetinensis Agricultura*. Vol. 79 s. 133–138.
- KUCHAR L. 2004. Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes. *Mathematics and Computers in Simulation*. Vol. 65 s. 69–75.
- KUCHAR L., 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*. Pr. zbior. Red. A. Kotecki. Wrocław. Wydaw. AR s. 205–214.
- LALL U., SHARMA A. 1996. A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*. Vol. 32 s. 679–693.
- LANDMAN W.A., MASON S.J., TYSON P.D., TENNANT W.J. 2001. Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow. *Journal of Hydrology*. Vol. 252 s. 221–236.
- MACDONALD G., SERTORIO L. (red.) 1991. *The global climate and ecosystems change*. New York. Plenum Press. ISBN 978-0306437151 ss. 268.
- MEARNS L.O., ROSEZWEIG C., GOLDBERD R. 1997. Mean and variance change in climatic scenarios. *Methods agricultural applications and measures of uncertainty*. *Climate Change*. Vol. 35 s. 367–396.
- MERRITT W.S., ALILA Y., BARTON M., TAYLOR B., COHEN S., NEILSEN D. 2006. Hydrologic response to scenarios change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *Journal of Hydrology*. Vol. 326 s. 79–108.
- MINVILLE M., BRISSETTE F., LECONTE R. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*. Vol. 358 s. 70–83.
- NIELSEN, S.A., HANSEN E. 1973. Numerical solution of the rainfall runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*. Vol. 4 s. 171–190.
- PARLANGE M.B., KATZ R.W. 2000. An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 39 s. 610–622.
- PARRY M.L., CANZIANI O.F., PALUTIKOF J.P., VAN DER LINDEN P.J., HANSON C.E. (red.) 2007. *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. UK. Cambridge Univ. Press ss. 976.
- RAJAGOPALAN B., LALL U. 1999. A k-nearest-neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables. *Water Resources Research*. Vol. 35 s. 3089–3101.
- RICHARDSON C.W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research*. Vol. 17 s. 182–190.
- ROSENZWEIG C. 1989. Global climate change: Predictions and observations. *American Journal of Agricultural Economics*. Vol. 71 s. 1265–1271.
- SEMENOV M.A., BROOKS R.J., BARROW E.M., RICHARDSON C.W. 1998. Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climate. *Climate Research*. Vol. 10 s. 95–107.
- SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M., MILLER H.L. (red.) 2007. *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I

- to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Cambridge University Press ss. 996.
- SRIKANTHAN R., MCMAHON T.A. 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: a review. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. Vol. 5 s. 653–670.
- THORNTON P.E., RUNNING S.W., WHITE M.A. 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*. Vol. 190. s. 214–251.
- WALPOLE R.E., MYERS R.H. 1993. Probability and statistics for engineers and scientists. New York. MacMillan Publ. Comp. ISBN 978-0024242013 ss. 780.
- WILBY R.L. 1994. Stochastic weather type simulation for regional climate change impact. *Water Resources Research*. Vol. 30 s. 3395–3403.
- WILBY R.L., CONWAY D., JONES P.D. 2002. Prospects for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. *Hydrological Processes*. Vol. 16. s. 1215–1234.
- WILKS D.S. 1998. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*. Vol. 210 s. 178–191.
- WILKS D.S. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences. Wyd. 2. Int. Geophys. Soc. 59. Academic Press. ISBN 0-12-751966-1 ss. 627.
- WILLEMS P. 2001. A spatial rainfall generator for small spatial scales. *Journal of Hydrology*. Vol. 252 s. 126–144.

Leszek KUCHAR, Sławomir IWĄŃSKI, Leszek JELONEK, Wiviana SZALIŃSKA

MODELLING FLOWS IN THE KACZAWA RIVER FOR THE YEARS 2030 AND 2050 (SUMMER HALF-YEAR)

Key words: *climate change scenarios, rainfall-runoff model, the Kaczawa River catchment, weather generator*

S u m m a r y

The paper presents an effect of potential climate changes on water runoff from the Kaczawa River catchment in summer halves of the years 2030 and 2050. The runoffs for the studied periods were calculated using the rainfall-runoff model NAM. Meteorological data required by the NAM model were generated by the model SWGEN calibrated on daily data from the years 1981–2000. Data included observations of the maximum, minimum and average air temperature, precipitation and sunshine. The values of global radiation were estimated using the Black's formula. Missing characteristics were interpolated from the existing data. Simulations were performed for current climatic conditions and for the three selected scenarios: GISS, CCCM and GFDL. The values of potential evaporation were estimated using the modified Turc's formula. Changes in the outflow were illustrated by probability distribution functions and descriptive characteristics. Simulations enabled identification of potential changes in mean daily discharge at the gauge Piątница. Based on simulations, an increase in the probability of extreme runoffs is expected.