

Maciej Lenartowicz\*  
Małgorzata Gutry–Korycka\*\*

REGIONALNE UWARUNKOWANIA REAKCJI RZEK  
NA DESZCZE NAWALNE W WARUNKACH RZECZYWISTYCH  
I W PERSPEKTYWIE GLOBALNEGO OCIEPLENIA KLIMATU

**Regional conditioning of the rivers response to heavy rainfall  
in actual conditions and in the perspective of global warming**

**Abstract:** The global warming is important factor influencing changes in water circulation. Global Circulation Models (GCMs) developed in the last decades have enabled assessment of global warming effect. The goal of this study is to apply the mathematical rainfall – runoff model to evaluate the rate and direction of changes in flood formation resulting from climate changes using historical data and generated by *ECHAM4* GCM in 5 selected basins in Poland. The study confirm that main factors controlling flood formation in present are precipitation intensity, topography and land cover. According to modeling results in the perspective of 80 – 90 years only the floods in Carpathian region will exceed those observed in the past years. In the Polish Lowlands maximum precipitation totals of  $p=1\%$  will be from 20 to even 50% lower than in the last decades, thus river runoff will decrease.

**Słowa kluczowe:** formowanie wezbrań, model opad-odpływ, globalne ocieplenie, opady nawalne, *MIKE SHE*.

**Key words:** flood formation, global warming, heavy rainfall, rainfall–runoff model, *MIKE SHE*

WSTĘP

Poglądy na temat zwiększania lub zmniejszania odpływu pod wpływem globalnego ocieplenia klimatu są rozbieżne, jednak większość autorów reprezentuje pogląd, że wpływa ono na zmiany ustroju rzek oraz intensywność ich wezbrań. Y. Hirabayashi i in. (2008) dokonali oceny ryzyka wystąpienia maksymalnych

---

\* e-mail: mlenarto@uw.edu.pl;

\*\* e-mail: msgutryk@uw.edu.pl

wzbrań rocznych rzek świata na podstawie danych archiwalnych z wielolecia 1901 – 2000 oraz w wyniku zmian globalnych klimatu, uwzględniając prognozy na lata 2001 – 2030 i 2071 – 2100 (podobnie jak np. model *ECHAM4*). Wykorzystano do tego celu estymację za pomocą globalnego modelu japońskiego *MIROC* o rozdzielczości przestrzennej  $\frac{1}{4}^{\circ} \times \frac{1}{6}^{\circ}$  czyli  $320 \times 160$  gridów i długą, 100-letnią archiwalną serię przepływów dobowych, obejmującą wielolecie 1901 – 2000, na której dokonano jego kalibracji i testowania metodą Monte Carlo. Jak z ich symulacji wynika, czas powtarzalności powodzi i wielkich wezbrań rzek Europy Środkowej i Północnej ulegnie w XXI wieku coraz większemu skróceniu z 1/100 lat do 1/60 – 1/80 lat, natomiast wartość dobowa  $Q_{\max}$  rzek wzrośnie nawet 3 do 4 razy w stosunku do okresu 1901 – 2000.

Czas powtarzalności przepływów maksymalnych prawdopodobnych, jak wykazali wcześniej H. Middelkoop i B. Parmet (1998) oraz P. Milly i in. (2002) w regionie Europy, w tym rzek polskich, ulegnie wyraźnemu wzrostowi, co połączą za sobą wzrost powodziowości.

Jeżeli przyjmujemy hipotezę, że wielce prawdopodobne są zmiany klimatyczne, to staje się ważnym celem ocena, w jakim stopniu rzeki w różnych regionach Polski mogą zareagować na globalne ocieplenie i czy tempo to jest jednakowe.

Postępujące zmiany klimatu i ich wpływ na obieg wody w zlewni postawiły przed hydrologią nowe zadania natury prognostycznej. W ich rozwiązywaniu pomocne są różnej kategorii i rozdzielczości modele matematyczne opisujące transformację opadów w odpływ wezbraniowy rzek. O ile rozwój wielu modeli matematycznych opad-odpływ w zlewni trwa od kilku dekad, o tyle ich wykorzystanie do oszacowania zmian wywołanych globalnym ociepleniem klimatu jest stale aktualne. Dotychczasowe rozwiązania i metody oceny niestacjonarności przeprowadzone przez M. Gutry-Korycką (1996) Z. Kaczmarka (1996), Z. Kundzewicza i M. Radziejewskiego (2002) i Z. Kundzewicza i in. (2005) stanowiły podstawę prognoz długoterminowych odpływu rzek. Szczególne zatem uzasadnienie znajduje metoda symulacji numerycznej, za pomocą której dokonywane jest oszacowanie tego wpływu na różne procesy hydrologiczne, także odpływ wezbraniowy rzek. Odpowiednie dane wejściowe (temperatura powietrza, opady atmosferyczne) do oceny wpływu w zlewni zapewniają Globalne Modele Cykulacji Atmosfery (GCMs). Najlepszym rozwiązaniem metodycznym wydaje się zastosowanie fizycznie uzasadnionych modeli zlewni o parametrach przestrzennie rozłożonych, w których opis uwzględnia zmienność obszarową procesów hydrologicznych. Sprzyja temu coraz bardziej powszechny dostęp do baz danych czasowo-przestrzennych gromadzonych i przetwarzanych w Systemach Informacji Geograficznej (GIS).

Liczne próby identyfikacji parametrów fizycznych, kalibracji i weryfikacji modeli matematycznych zlewni w celu ich różnego, dalszego zastosowania w badaniach regionalnych przedstawili między innymi Y. G. Motovilov i in. (1999),

którzy wykorzystali integralny model zlewni *ECOMAG* o parametrach przestrzennie rozłożonych. Jako wejście posłużyły pomiary opadów, uwzględniające zmienne ich pole; także inne elementy przedstawiono w zróżnicowanej rozdzielczości, takie jak: cyfrowy model rzeźby terenu (DTM), mapa pokrycia, mapa typów gleb zlewni oraz inne pomiary hydrologiczno-meteorologiczne z sieci obserwacyjnej. Obiektami modelowanymi były zlewnie badawcze włączone do projektu *NOPEX* realizowanego w Szwecji.

Innym przykładem oceny wpływu zmian klimatycznych może służyć zastosowanie modelu integralnego *MIKE SHE/MIKE11* do oceny wpływu w zlewniach bagiennych (Thompson i in., 2008). Badanym obiektem modelowanym była zlewnia nizinna pokryta łąkami i mokradłami Elmley Marshes położonymi w pobliżu ujścia Tamizy na wyspie Sheppey. Integralny model zlewni mokradłowej uwzględniał opis dynamiczny wielu procesów: opady atmosferyczne, intercepcja szaty roślinnej, parowanie potencjalne, odpływ powierzchniowy, odpływ rzeczny (korytowy), dwa podsystemy: strefę aeracji oraz saturacji (Thompson i in., 2004). Po specyfikacji i identyfikacji parametrów dokonano kalibracji i weryfikacji modelu. Jako dane wejścia do modelu zastosowano predykcję elementów meteorologicznych sięgającą lat 50. XXI wieku, pochodzące z brytyjskiego globalnego modelu klimatu z programu UK Climate Impacts Programme (*UKCIP02*). Wyjście z modelu stanowiły stany wód podziemnych oraz powierzchniowy zasięg podtopień dolinnych. Wszystkie rozpatrywane symulacje zmian klimatu wg różnych scenariuszy wskazują na wydłużanie i pogłębianie się niżówek oraz ograniczanie podtopień, zarówno w czasie jak i przestrzeni.

Podobne wyniki uzyskali K. Eckhardt i U. Ulbrich (2003), którzy zastosowali model fizyczny *SWAT-G* (Soil-Water-Atmosphere-Global) do symulacji procesów hydrologicznych, rozpatrywanych wg różnych scenariuszy zmian stężenia  $\text{CO}_2$ , w tym zwłaszcza na odpływ rzeczny w jednej ze zlewni Średniogórza Niemieckiego.

Jak podkreśla Z. Kundzewicz (2008) wzrost globalnego ocieplenia klimatu będzie według wielu autorów oddziaływał na zwiększenie wezbrań dużych rzek – także europejskich, z większą częstotliwością (co dwa do pięciu lat). Nastąpi zatem jak się ocenia istotna zmiana prawdopodobieństwa przekroczenia  $Q_{\text{maxrz}}$  w kierunku wyższych prawdopodobieństw z  $p=1\%$  (raz na 100 lat) na  $p=10\%$  (raz na 10 lat) a zatem czas ich powtarzalności ulegnie skróceniu.

Niekorzystne zjawiska atmosferyczne wywołują różnorodne anomalie pogodowe, mogące stanowić efekt skumulowanych, globalnych zmian klimatu Ziemi. Grożą one znacznymi konsekwencjami, np. zaburzeniem stabilności procesów klimatycznych. Pogoda i klimat wykazują istotny wpływ na hydrosferę – w tym wody powierzchniowe i podziemne. Decydują one o transporcie w atmosferze masy i energii pochodzącej ze Słońca czy erupcji wulkanów.

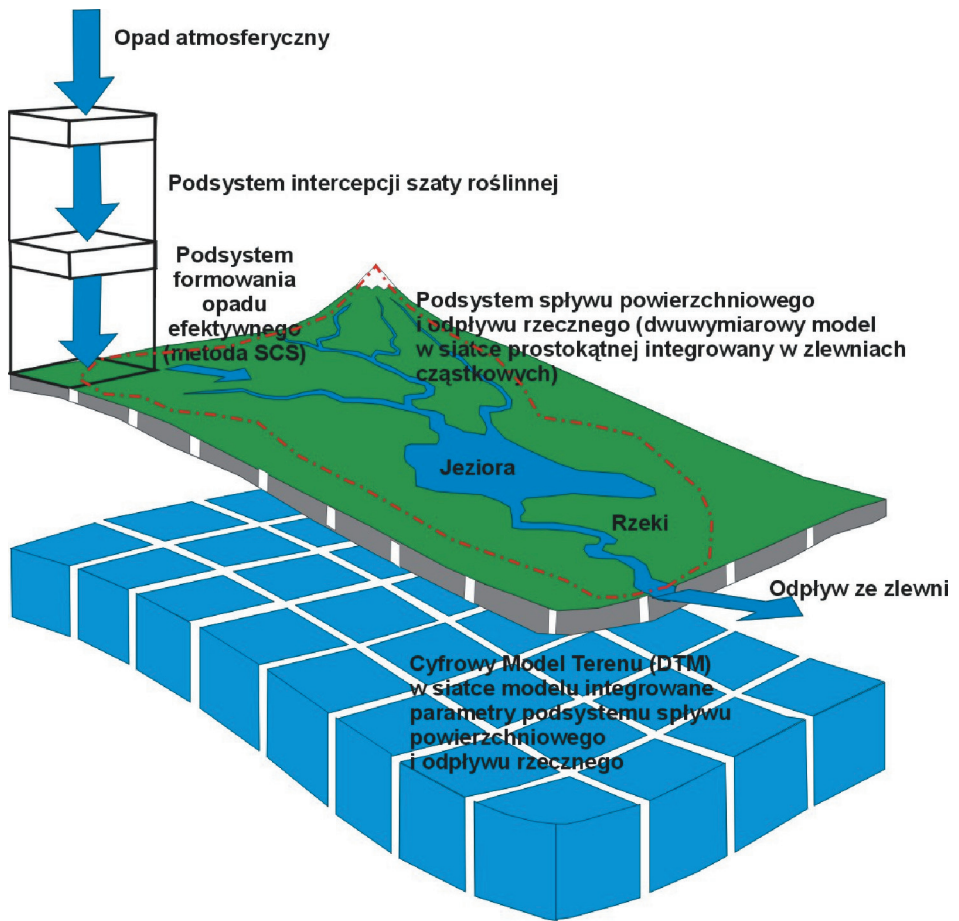
Jednym z najważniejszych celów niniejszego projektu była identyfikacja i specyfikacja parametrów, kalibracja i weryfikacja matematycznego modelu zlewni o parametrach przestrzennie rozłożonych, opisującego transformację opadów w odpływ rzeczny. Na podstawie meteorologicznych i hydrologicznych danych archiwalnych IMGW, zgodnie z zasadami modelowania sformułowanymi przez U. Soczyńską (1997) zostało zastosowane podejście symulacyjne, polegające na opisie reakcji zlewni na opady deszczu w warunkach współczesnych i w perspektywie globalnych zmian klimatu. Do tego celu wykorzystano wygenerowane dane klimatyczne, pochodzące z Globalnych Modeli Cyrkulacji Atmosfery, jako podstawy do uzyskania prognozowanego elementu hydrologicznego.

Postępujące ocieplenie klimatu jest następstwem emisji gazów szklarniowych, takich jak: dwutlenek węgla, metan, amoniak, tlenek i podtlenek azotu, freon, para wodna i inne. Powoduje ono zmiany podstawowych elementów klimatu, między innymi takich jak temperatura powietrza i opady atmosferyczne. Aby była możliwa ocena zmian hydrologicznych należy wygenerować przebieg powyższych elementów za pomocą globalnych modeli klimatycznych (GCMs). Spośród 12 istniejących modeli globalnych wybrano model niemiecki ECHAM4 o rozdzielczości czasowej 1 doba i przestrzennej  $1^\circ \times 1^\circ$ . Ze względu na fakt, że symulowane wezbrania rzek zdarzały się wyłącznie w cieplej porze roku, pominięto podsystem topnienia pokrywy śnieżnej. Wybrany model GCM pozwala zastosować go do prognozy sumy opadów, sięgając horyzontu czasowego końca XXI wieku, czyli do 2100 roku.

Dane wejściowe z modelu *ECHAM4* wprowadzone do hydrologicznego modelu opad – odpływ zostały wykorzystane do oceny tempa zmian procesów hydrologicznych, zwłaszcza odpływu wezbraniowego, w wyniku globalnego ocieplenia.

## METODYKA BADAŃ

Do oceny reakcji rzek na opady nawalne w warunkach rzeczywistych i w perspektywie globalnego ocieplenia klimatu zastosowano integralny model matematyczny o parametrach fizycznie uzasadnionych, który pozwala opisać transformację opadów w odpływ. Jest to model o parametrach przestrzennie rozłożonych, wchodzący w skład pakietu *MIKE SHE* – wersja 2004. Pakiet oprogramowania opracowany przez międzynarodowy zespół hydrologów z Danii, Wlk. Brytanii i Francji daje bardzo szerokie możliwości zastosowania oraz znaczny wachlarz wyboru modułów opisujących poszczególne elementy i fazy cyklu hydrologicznego (Refsgaard, Storm, 1995; Graham, Butts, 2005). Wybrane moduły pakietu wykorzystane w badaniach przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1.** Schemat wybranych podsystemów pakietu *MIKE SHE* (na podstawie *MIKE SHE...*, 2004 zmienione)

**Fig. 1.** Scheme of selected subsystems of the *MIKE SHE* package (based on *MIKE SHE...*, 2004 modified)

Głównym procesem modelowanym, uwzględnionym w wybranym wariantcie transformacji był moduł formowania się spływu powierzchniowego (rys. 1, rys. 2). Proces ten opisany jest równaniem ciągłości (1) wg:

$$D_2 = D_1 + (\bar{q}_s - \bar{q}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdzie:

$D_1, D_2$  – retencja zwilżania powierzchni stoku na początku i końcu kroku czasowego  $\Delta t$  ( $m^3$ ),

$q_s$  – przyrost spływu z jednostki powierzchni w kroku czasowym  $\Delta t$  ( $m^3 \cdot t^{-1}$ ),

$q$  – spływ powierzchniowy z jednostki szerokości stoku w kroku czasowym  $\Delta t$ , obliczany na podstawie równania (2) ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ):

$$q = M \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \left[ \frac{D}{L} \left( 1 + 3/5 \cdot \left( \frac{D}{D_e} \right)^3 \right) \right]^{5/3} \quad (2)$$

gdzie:

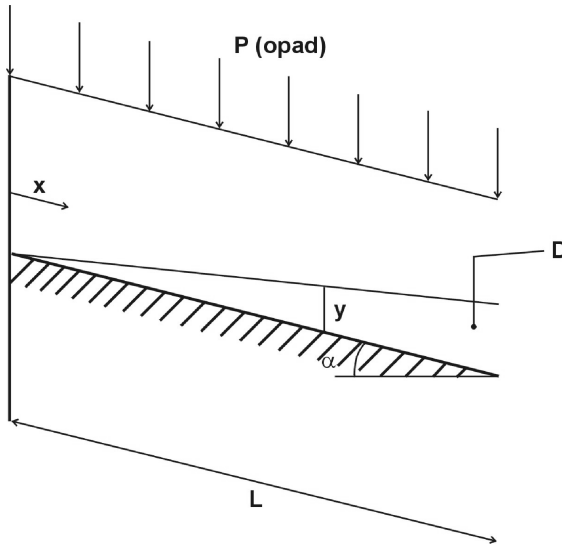
$M$  – odwrotność współczynnika szorstkości powierzchni  $n$  Manninga ( $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ),

$\alpha$  – kąt nachylenia stoku,

$L$  – długość stoku (m),

$D$  – objętość wody spływającej po stoku ( $\text{m}^3$ ),

$D_e$  – objętość wody zwilżającej stok w stanie równowagi (*equilibrium*) ( $\text{m}^3$ ).



**Rys. 2.** Schemat modelu formowania się spływu powierzchniowego (*MIKE SHE...*, 2004)

$L$  – długość stoku;  $D$  – objętość wody spływającej po stoku;  $\alpha$  – nachylenie stoku,  $x$  – odległość mierzona zgodnie z kierunkiem spadku stoku,  $y$  – wysokość warstwy spływu,  $P$  – opad atmosferyczny

**Fig. 2.** Diagram of overland flow formation model (*MIKE SHE...*, 2004)

$L$  – length of the slope,  $D$  – volume of water flowing down the slope,  $\alpha$  – gradient of the slope,  $x$  – distance measured down the slope,  $y$  – depth of flow,  $P$  – precipitation

Rozwiązanie równania ciągłości uwzględnionego w modelu spływu powierzchniowego było podyktowane kilkoma przyczynami. Po pierwsze, różna dostępność do danych w poszczególnych zlewniach modelowanych nie pozwo-

liła uwzględnić podsystemu strefy aeracji i saturacji z powodu braku reprezentatywnych posterunków pomiarowych wód podziemnych oraz słabego rozpoznania rodzajów gleb, zwłaszcza w zlewniach zalesionych. Po drugie, symulacja reakcji zlewni na opady nawalne dotyczyła wyłącznie okresu wegetacyjnego, co uzasadniało pominięcie podsystemu topnienia pokrywy śnieżnej.

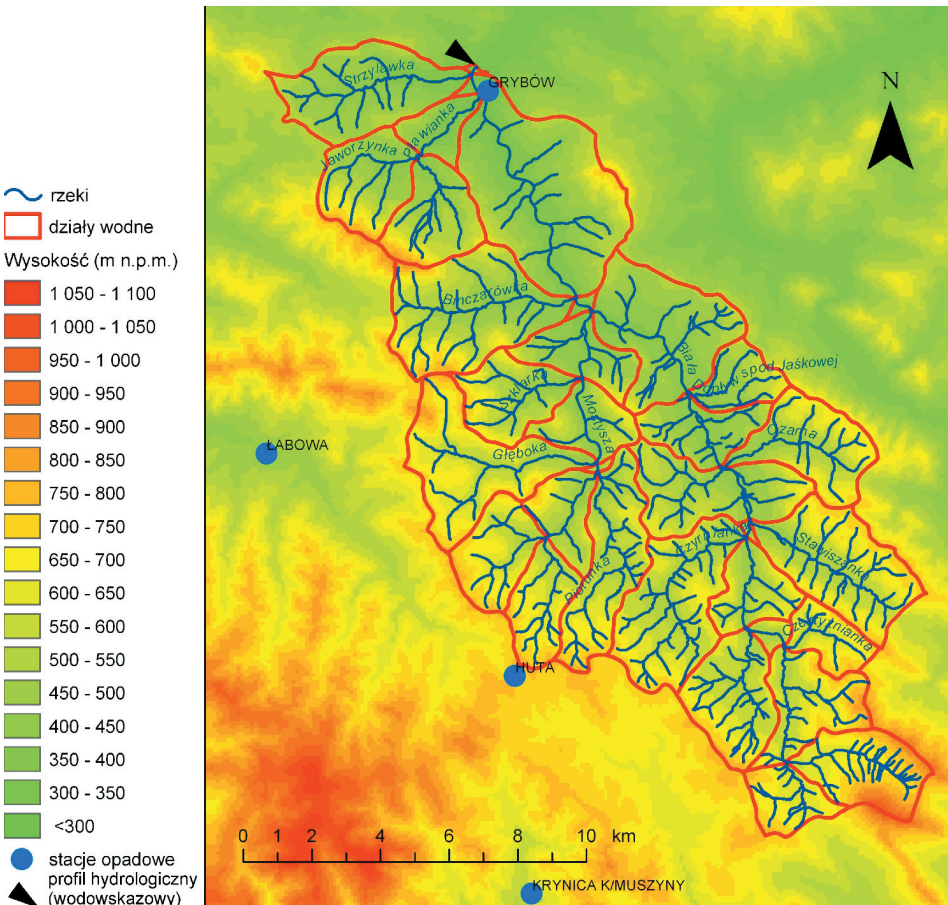
Identyfikacja parametrów fizycznych modelu w podsystemach była przeprowadzona na podstawie dostępnych cyfrowych baz danych przechowywanych w Systemach Informacji Geograficznej. Wykorzystano następujące dane:

- Mapa Podziału Hydrograficznego Polski (2004) (zasięg zlewni, sieć rzeczna),
- Cyfrowy model rzeźby terenu o rozdzielczości 30 m × 30 m, wykonany na podstawie danych z bazy V-Map Level 2 (udostępniany przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii),
- Corine Land Cover 1990 i 2000 (pokrycie terenu) udostępniony przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.

Do pozostałych źródeł informacji przestrzennej, niezbędnej do identyfikacji parametrów w równaniach matematycznych, wykorzystano mapy geologiczne w różnych skalach od 1:50 000 do 1:500 000, a zatem o odmiennej szczegółowości.

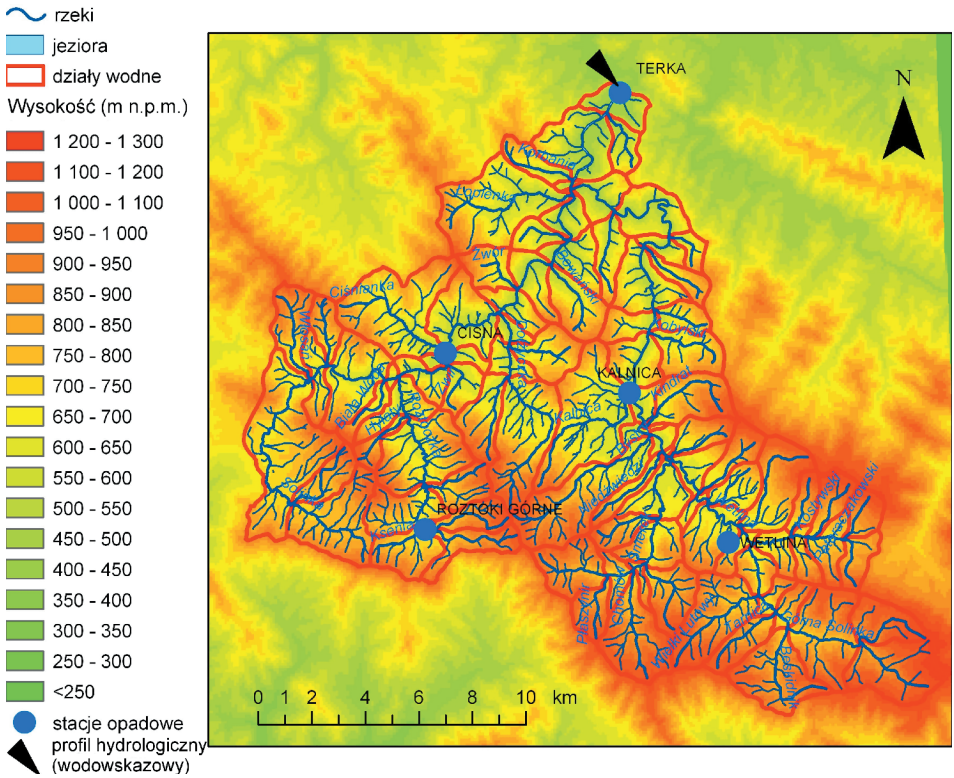
Wejście do podsystemu spływu powierzchniowego stanowiły opady dobowe w ujęciu przestrzennie rozłożonym tzn. pola zmienności obszarowej deszczu nawalnego, wygenerowanego na podstawie dobowych sum opadów zmierzonych w sieci naziemnych posterunków IMGW. Zrekonstruowano je za pomocą interpolacji danych z naziemnych stacji opadowych (rys. 3–7) metodą odwrotnych odległości. Próba wykorzystania dostępnych danych radarowych nie powiodła się, ze względu na zbyt duże rozbieżności z pomiarami naziemnymi. Przyjęta siatka obliczeniowa posiadała wymiary 100 m × 100 m, natomiast rozdzielczość czasowa wynosiła 1 dobę. Warstwa opadu efektywnego (netto) była obliczana w polach nieregularnych. Transformację opadów w opad efektywny obliczano oddzielnie w każdej z kolejnych zlewni cząstkowych w 5 modelowanych zlewniach (rys. 3–7). Uwzględniono w tym podziale przestrzennym cechy utworów powierzchniowych (mapy geologiczne i glebowo-rolnicze) oraz rodzaje pokrycia terenu w każdej zlewni cząstkowej (wg danych Corine Land Cover 1990 i 2000). Zastosowany w modelu parametr CN, opisujący udział opadu efektywnego w całkowitej sumie opadu dobowego w każdej ze zlewni cząstkowych, szacowano za pomocą metody SCS zgodnie z instrukcjami opublikowanymi przez U.S. Soil Conservation Service (1986). Kolejnymi parametrami identyfikowanymi w zlewniach cząstkowych były: średni spadek cieku głównego (‰), średnia długość stoku (m) oraz  $M$  – odwrotność współczynnika szorstkości  $n$  Manninga ( $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ ) szacowany zgodnie z instrukcjami przedstawionymi w „National Engineering Handbook” (1972) opublikowanym przez U.S. Department of Agriculture.

Wyjście z modelu stanowiła seria dobowych przepływów w wybranym okresie symulacji w profilu zamykającym zlewnię. Stanowiły one podstawę do weryfikacji modelu i porównania serii przepływów pomierzonych z symulowanymi.



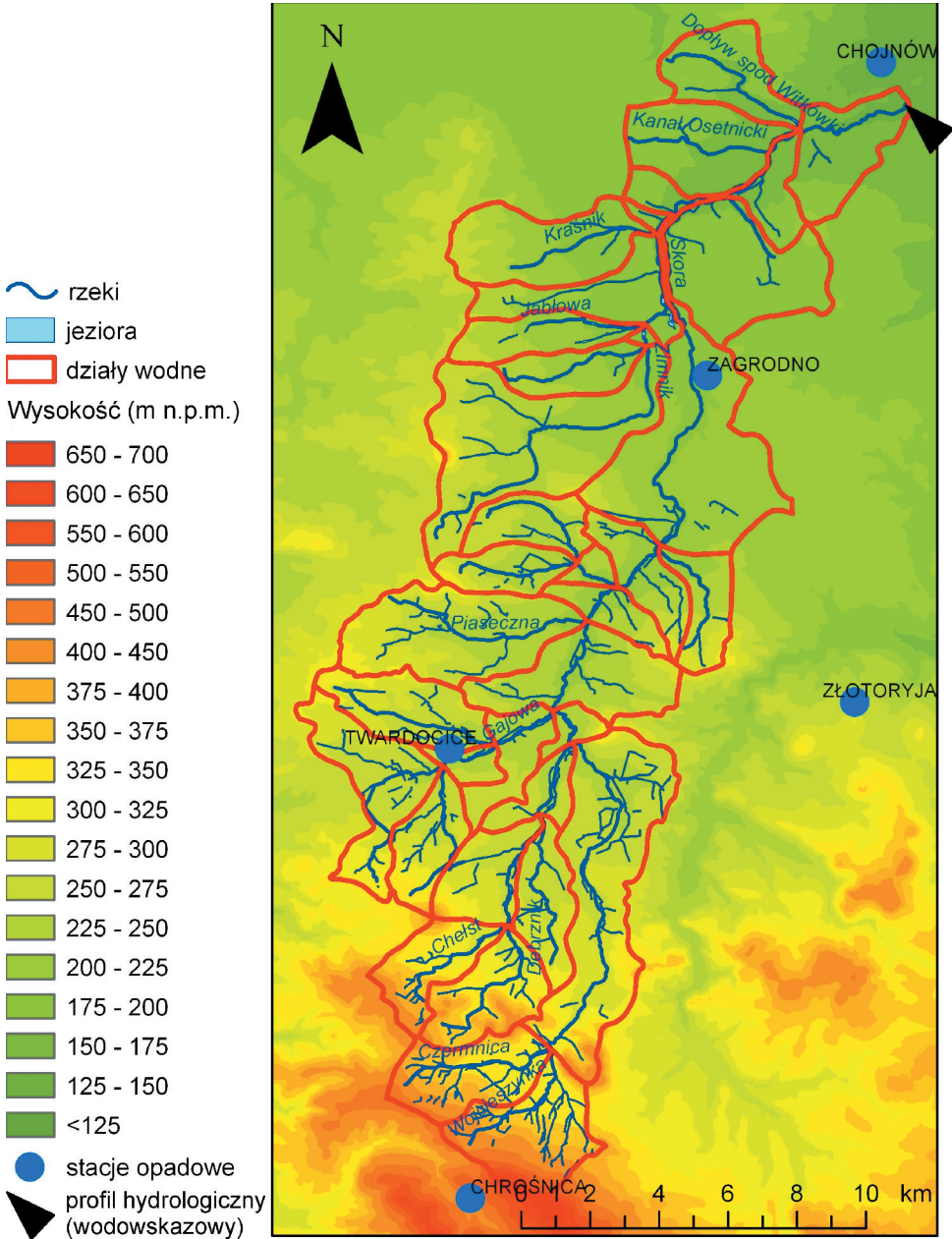
**Rys. 3.** Zlewnia Białej Tarnowskiej po profil Grybów  
**Fig. 3.** Catchment of the river Biała Tarnowska – Grybów





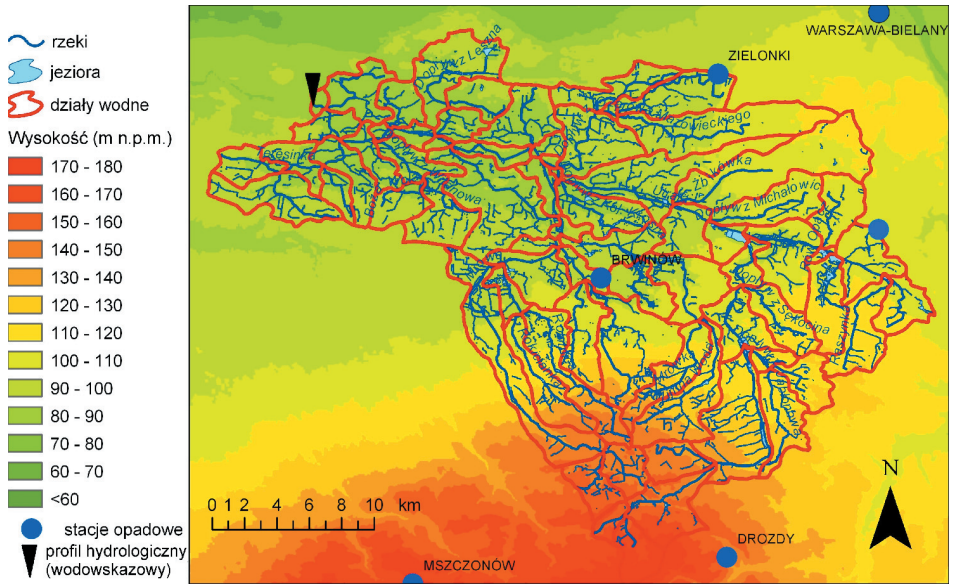
Rys. 4. Zlewnia Solinki po profil Terka

Fig. 4. Catchment of the river Solinka – Terka

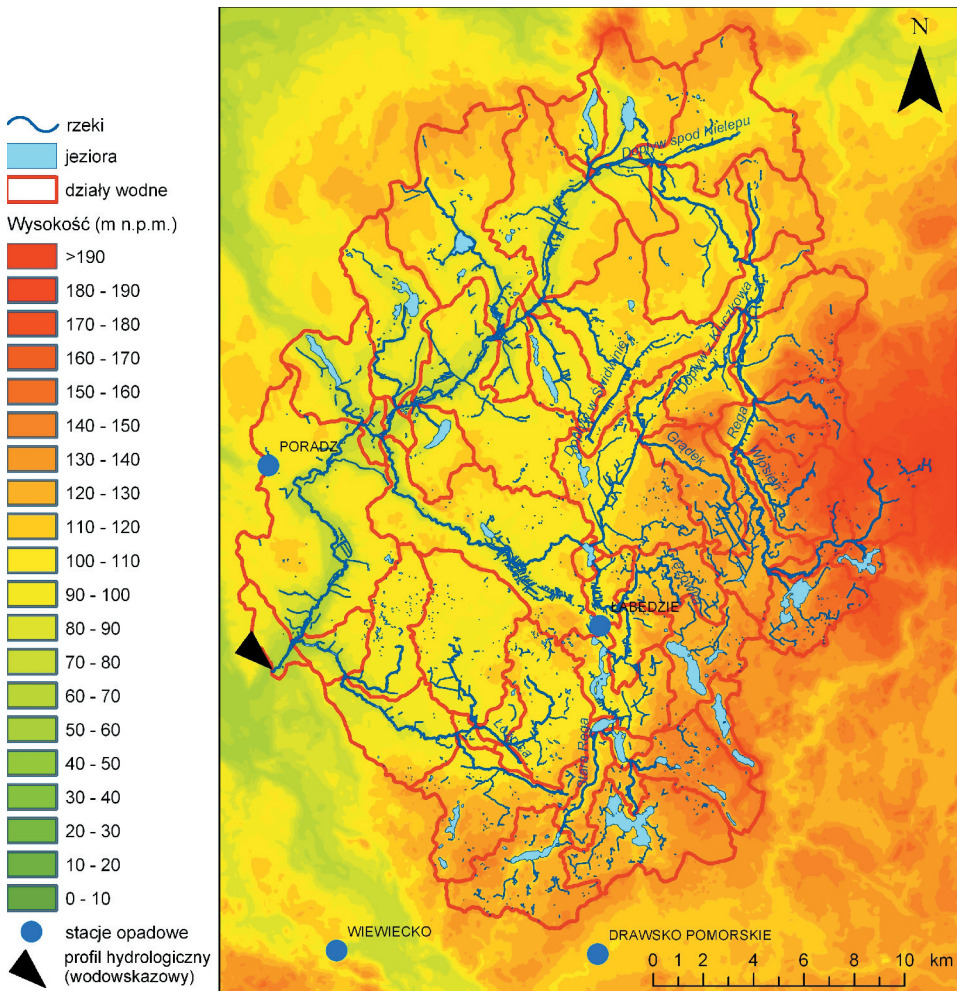


Rys. 5. Zlewnia Skory po profil Chojnów

Fig. 5. Catchment of the river Skora – Chojnów



**Rys. 6.** Zlewnia Utraty po profil Krubice  
**Fig. 6.** Catchment of the river Utrata – Krubice



Rys. 7. Zlewnia Regi po profil Łobez

Fig. 7. Catchment of the river Rega – Łobez

### I faza modelowania

W pierwszej fazie modelowania dokonano identyfikacji parametrów, a następnie rozwiązywane równania poddano kalibracji i weryfikacji formowania się fal wezbraniowych na podstawie empirycznych danych archiwalnych. W 5 zlewniach modelowanych zostały wybrane epizody opadowe wywołujące fale wezbraniowe o rzędnych, których prawdopodobieństwo przekroczenia  $p$  było możliwie małe. W większości przypadków reprezentowały one ekstremalnie wysokie wartości natężenia opadu jak i natężenia przepływu cieku głównego.

Na zakończenie tego etapu badań dokonano oceny jakości modelu matematycznego, wykorzystując proste miary statystyczne takie jak współczynnik korelacji  $R$  oraz średni błąd kwadratowy  $RMSE$ .

## II faza modelowania

W drugiej fazie modelowania, rzeczywiste dane meteorologiczne wejścia, czyli opady nawalne, zostały zastąpione danymi syntetycznymi. Przy niezmiennych parametrach fizycznych zlewni modelowanych, symulowano ich reakcję na wymuszenia spowodowane deszczem nawalnym o założonym prawdopodobieństwie przekroczenia wynoszącym  $p=1\%$ . Do tego celu została wykorzystana baza danych pluwiograficznych, przygotowana specjalnie dla projektu zamawianego, zawierająca maksymalne sumy dobowe opadów z wielu stacji na obszarze Polski, obejmująca wielolecie 1956 – 1980 (Stach, 2007). Baza ta stanowiła podstawę do obliczenia sumy opadu nawalnego o prawdopodobieństwie przekroczenia  $p=1\%$ . Wartości prawdopodobne opadów zostały obliczone w punktach odpowiadających lokalizacji środka ciężkości każdej zlewni modelowanej. Założony impuls opadowy o prawdopodobieństwie  $p=1\%$  został wykorzystany do transformacji w opad symulowany.

## III i IV faza modelowania

W trzeciej i czwartej fazie do symulacji odpływu zostały wykorzystane ciągi wygenerowanych opadów atmosferycznych, uzyskane z Globalnych Modeli Cyrkulacji Atmosfery służące do długookresowej prognozy zmian globalnych klimatu. Spośród 12 modeli globalnych wybrany został model matematyczny *ECHAM4*, opracowany w Instytucie Maxa Plancka (Max-Planck Institute for Meteorology) w Hamburgu (Niemcy). Jego strukturę i opis działania, wraz z dokładnością i niepewnością modelowania, przedstawili twórcy modelu E. Roeckner i in. (1992, 1996). Jest to jeden z niewielu modeli globalnych, z którego otrzymane wyniki, tzn. suma opadu atmosferycznego i temperatura powietrza w latach 2046–2065 (pierwszy okres prognozy), charakteryzują się rozdzielczością dobową. W drugim okresie prognozy generowane są dobowe wartości elementów meteorologicznych w horyzoncie czasowym 2081–2100. Wymieniony w Raporcie IPCC (2000, 2007) scenariusz rozwoju ekonomicznego związany z emisją  $CO_2$  i innych gazów szklarniowych do atmosfery został wybrany do symulacji procesu odpływu. Jest to scenariusz rozwoju zrównoważonego *SRES1b* (Special Report Emissions Scenarios – N. Nakićenovič, R. Swart (2000)), zakładający stabilizację emisji i stężenia  $CO_2$  w atmosferze na poziomie 720 ppm.

## OBIEKTY MODELOWANIA

Opis matematyczny transformacji pola deszczu nawalnego w odpływ wezbraniowy rzeki przeprowadzono w 5 zlewniach pozostających pod wpływem zróżnicowanych warunków fizycznogeograficznych. Dwie zlewnie górskie są położone w obrębie Karpat Zachodnich: zlewnia *Białej Tarnowskiej po profil Grybów* leży w Beskidzie Niskim (rys. 3), zaś *Solinki po profil Terka* w Bieszczadach Zachodnich (rys. 4). W peryferyjnej części Sudetów zlokalizowana jest wyżynna zlewnia *Skory po profil Chojnów*, której górną i środkową część stanowią Góry Kaczawskie i Pogórze Kaczawskie natomiast dolną Równina Chojnowska, należąca do Niziny Śląsko-Łużyckiej (rys. 5). Pozostałe 2 zlewnie mają charakter nizinny i nizinno-pojezierny. Pierwsza, *Utraty po profil w Krubicach* leży na pograniczu Równiny Warszawskiej i Łowicko-Błońskiej (rys. 6), natomiast druga, jeziorna *Regi po profil Łobez* jest zlokalizowana na Pojezierzu Drawskim i Wysoczyźnie Łobeskiej (rys. 7) (Kondracki, 2000).

Wybrane zlewnie różnicuje nie tylko klimat, położenie geograficzne (odległość od Bałtyku) na tle podziału fizycznogeograficznego Polski, lecz również odmienna budowa morfogenetyczna i różna wielkość (od 200 do ponad 700 km<sup>2</sup>). Ponadto charakteryzują się odmiennymi parametrami strukturalnymi, jak deniwelacja, lesistość, jeziorność, czy też udział zwartej i luźnej zabudowy. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry modelowanych zlewni pozyskane na podstawie *Mapy Podziału Hydrograficznego Polski* (2004), map topograficznych w skali 1:25 000 w układzie UWPP 1992 (współrzędne kilometrowe środków ciężkości zlewni), bazy danych V-Map Level 2 (rzeźba terenu), baz danych Corine Land Cover 1990 i 2000 (Ciołkosz, Bielecka, 2005) oraz *Atlasu posterunków...* (1995) i danych IMGW (przepływy maksymalne w profilach zamykających).

## WYNIKI BADAŃ

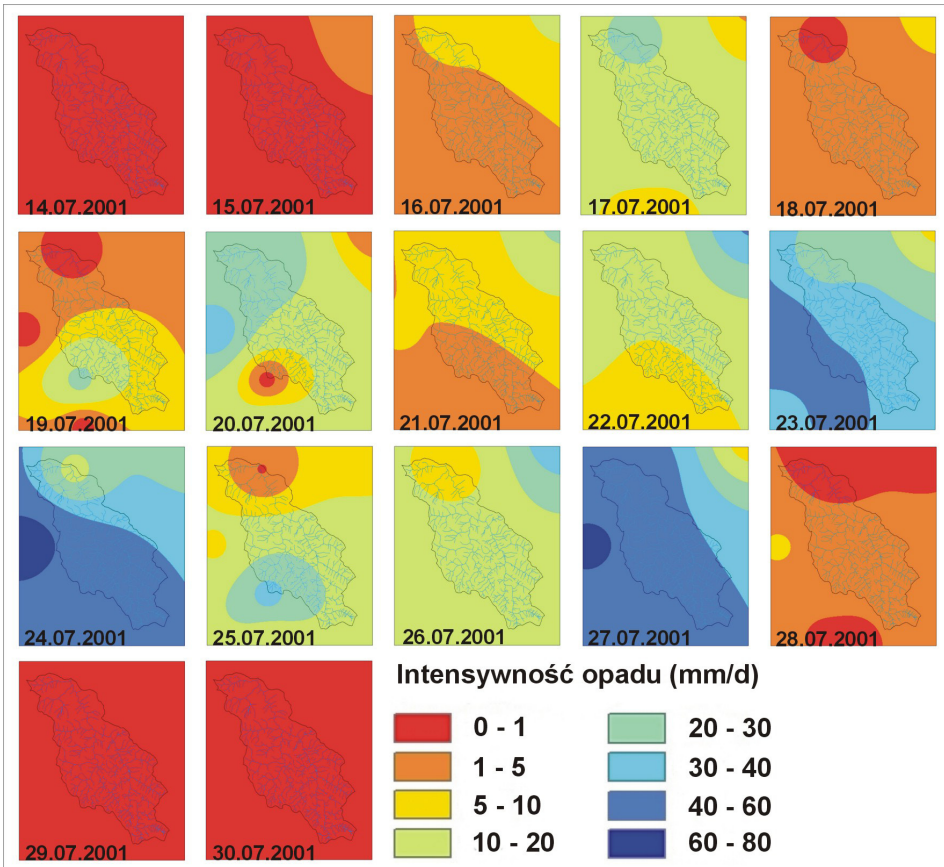
Ocena reakcji rzek na opady nawalne w układzie regionalnym w warunkach rzeczywistych i w perspektywie globalnego ocieplenia klimatu została przeprowadzona za pomocą czterech kolejnych faz modelowania.

**Tab. 1.** Charakterystyki zlewni modelowanych  
**Tab. 1.** Characteristics of the modeled catchments

Parametry		Biała / Grybów	Solinka / Terka	Skora / Chojnów	Utrata / Krubice	Rega / Łobez
Powierzchnia zlewni	(km <sup>2</sup> )	206,9	308,9	265,8	727,4	615,4
Współrzędne środka ciężkości zlewni	(m)	X=644613 Y=186389	X=747467 Y=151788	X=277307 Y=368853	X=617848 Y=477389	X=288184 Y=653564
Wysokość maksymalna	(m n.p.m.)	990	1298	673	176	198
Wysokość minimalna	(m n.p.m.)	327	432	143	82	58
Średni spadek zlewni	(‰)	10,0	15,0	8,0	2,0	2,0
Lesistość	(%)	53,3	91,0	19,7	8,7	26,0
Jeziorność	(%)	0,0	0,0	0,1	0,4	2,3
zabudowa	(%)	1,1	0,2	0,5	15,3	1,6
WWQ	(m <sup>3</sup> /s)	369 (1961–1990)	418 (1961–1990)	205 (1961–1990)	80 (1950–2000)	25 (1958–2006)

### I faza modelowania

W pierwszej fazie archiwalne dane liczbowe i kartograficzne (przestrzenne) były podstawą oszacowania danych wejściowych oraz identyfikacji parametrów modelu. Na podstawie dobowych danych z naziemnych stacji IMGW dokonano rekonstrukcji pola opadów atmosferycznych w 5 zlewniach w wybranych okresach. Przykład rekonstrukcji pola opadów w zlewni Białej Tarnowskiej przedstawiono na rysunku 8. Górską rzeka – Biała Tarnowska była traktowana jako zlewnia pilotażowa tzn. testowano w niej wszystkie kolejne etapy badań i wdrażano procedury modelowania. Na podstawie interpolacji sum dobowych opadu obliczono średnie dobowe natężenia opadu w środkach ciężkości wszystkich zlewni w badanych okresach (tab. 2). Uwzględniono zmienność przestrzenną podstawowych parametrów modelu identyfikowanych w zlewniach cząstkowych. Wybrane parametry uśredniono w każdej kolejnej zlewni cząstkowej i odniesiono do obszaru zlewni całkowitych (tab. 3).



**Rys. 8.** Rekonstrukcja pola opadu w zlewni Białej Tarnowskiej w dniach 14 – 30.07.2001 r. uzyskana w wyniku interpolacji danych z naziemnej sieci posterunków IMGW

**Fig. 8.** Precipitation pattern in the Biała Tarnowska river catchment between 14.07 and 30.07.2001 reconstructed using interpolation of data from IMWM network

W zlewni Solinki, Skory, Utraty i Regi symulacją objęto najwyższe wezbrania opadowe zapisane w danych pomiarowych, natomiast w zlewni Białej Tarnowskiej wykorzystano jedno z większych wezbrań, w którego wyborze kierowano się bardziej ilością dostępnych danych niż jego wielkością. W zlewniach Skory, Utraty i Regi symulowane fale wezbraniowe reprezentują zbliżone prawdopodobieństwo osiągnięcia przepływu maksymalnego wymuszonego w wyniku opadów deszczu o zbliżonym prawdopodobieństwie wystąpienia.



**Tab. 2.** Intensywność opadów  $I$  w środku ciężkości każdej zlewni modelowanej  
**Tab. 2.** Precipitation intensity  $I$  estimated in the geometric centre of the modeled catchments

Zlewnie	Biała/ Grybów	Solinka/ Terka	Skora/ Chojnów	Utrata/ Krubice	Rega/ Łobez
<b>Czas symulacji</b>	14.07.2001 – 30.07.2001	14.11.1992 – 25.11.1992	16.07.1981 – 01.08.1981	14.05.1962 – 15.06.1962	06.07.1996 – 24.07.1996
<b>Kolejne doby*</b>	$I$ (mm/d)				
1	0,0	0,3	0,0	2,0	0,0
2	0,2	1,1	3,4	90,2	0,0
3	3,5	77,5	48,5	29,2	27,6
4	13,6	20,9	83,0	0,1	68,9
5	2,6	8,6	49,9	2,0	0,0
6	8,0	0,9	2,1	0,0	10,5
7	15,4	5,0	0,6	0,0	4,4
8	5,2	3,2	1,1	17,9	0,0
9	11,5	0,7	30,2	9,0	0,0
10	37,5	0,0	1,6	1,0	0,0
11	45,4	0,0	3,9	1,0	0,0
12	17,2	1,4	11,2	8,0	0,0
13	14,5	-	11,0	12,9	2,8
14	44,7	-	0,2	4,0	0,0
15	1,8	-	0,1	1,0	0,0
16	0,0	-	0,0	1,0	0,0
17	0,0	-	0,0	4,0	0,0
18	-	-	-	0,2	0,0
19	-	-	-	1,0	4,4
20	-	-	-	1,0	-
21	-	-	-	1,1	-
22	-	-	-	5,0	-
23	-	-	-	29,8	-
24	-	-	-	8,1	-
25	-	-	-	0,0	-
26	-	-	-	0,0	-
27	-	-	-	0,0	-
28	-	-	-	0,0	-
29	-	-	-	0,0	-
30	-	-	-	3,0	-
31	-	-	-	0,0	-
32	-	-	-	0,0	-
33	-	-	-	0,0	-

\*Pole opadów obliczone na podstawie interpolacji metodą odwrotnych odległości między posterunkami pomiarowymi

**Tab. 3.** Parametry fizyczne modelu transformacji opadów w odpływ  
**Tab. 3.** Physical parameters of the rainfall – runoff model

Parametr		Biała/ Grybów	Solinka/ Terka	Skora/ Chojnów	Utrata/ Krubice	Rega/ Łobez
$M$ – Manninga <sup>1)</sup>	( $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ )	15	20	15	10	10
$CN$ <sup>2)</sup>		90	80	70	30	30
Liczba zlewni cząstkowych		34	97	37	72	60
Liczba posterunków opadowych	(szt.)	8	7	8	8	7

<sup>1)</sup>odwrotność współczynnika szorstkości  $n$  Manninga uśredniona w całej zlewni modelowanej

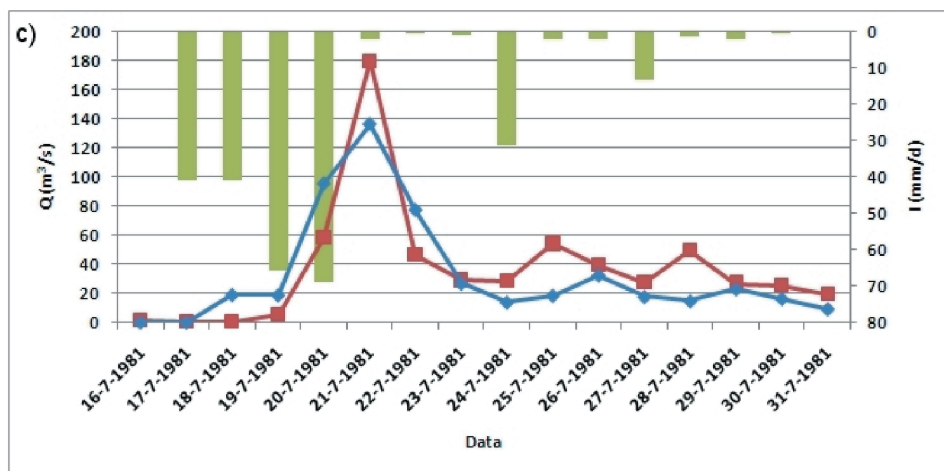
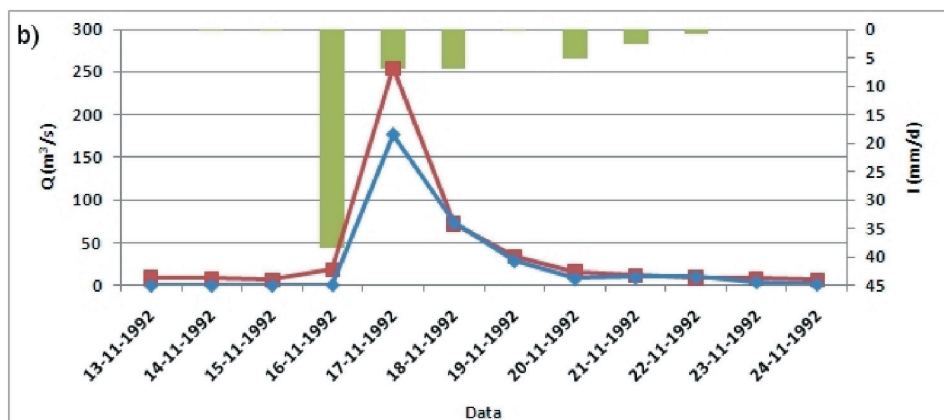
<sup>2)</sup>współczynnik  $CN$  wg metody SCS uśredniony w całej zlewni modelowanej

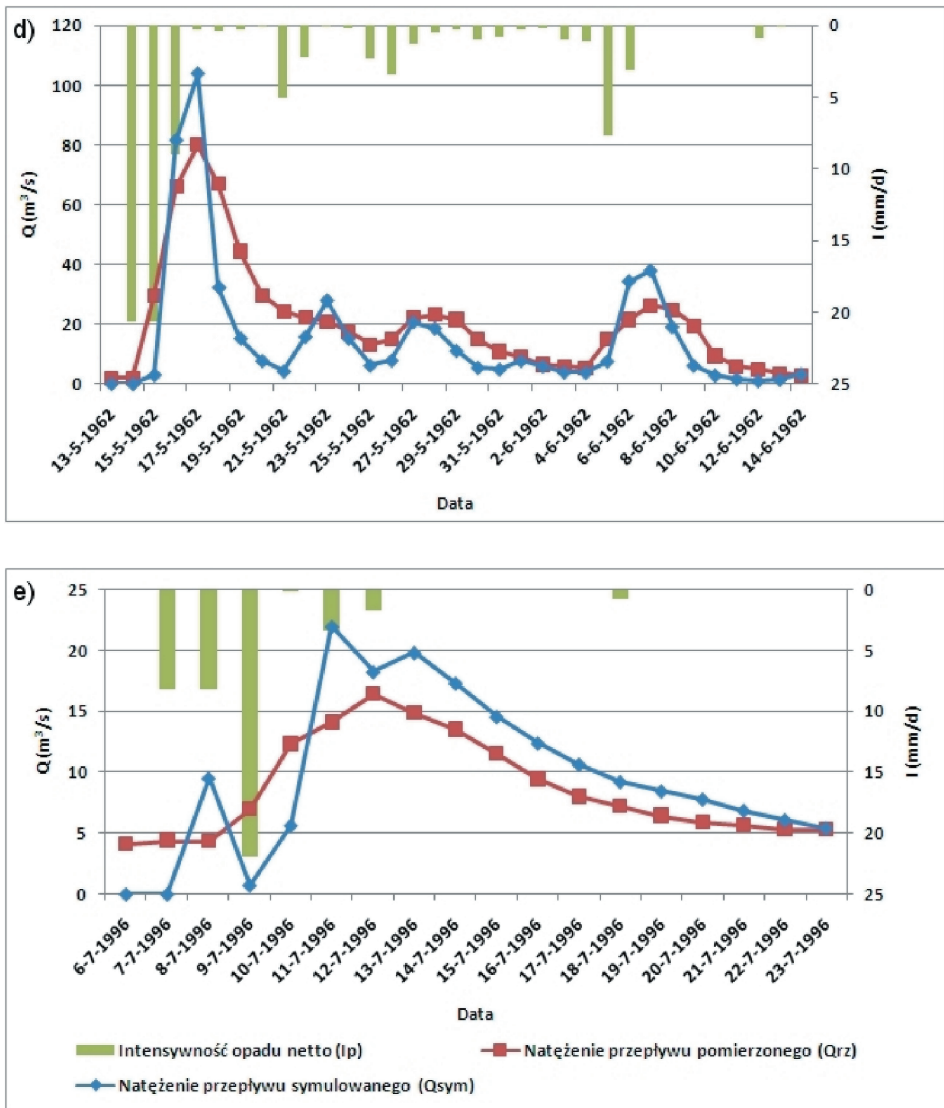
Wyniki kalibracji i weryfikacji zastosowanego modelu *MIKE SHE* przedstawiono na rysunku 9, w tabeli 4 i tabeli 5. Uzyskane wyniki symulacji wg przyjętych miar dopasowania świadczą o dobrych i względnie dobrych realizacjach zastosowanego modelu dynamicznego. Jednakże, zwraca uwagę przeszacowanie  $Q_{\max_{\text{sym}}}$  w stosunku do wartości pomierzonych  $Q_{\max_{\text{z}}}$  w zlewniach górskich i wyżynnych (Biała, Solinka i Skora), natomiast dosyć wyraźne niedoszacowanie  $Q_{\max_{\text{sym}}}$  obejmuje zlewnie nizinne (Utrata i Rega). Wartości symulowane poprzedzające osiągnięcie maksimum wezbrania, jak i następujące po nim są jednak zaniżone, co może wynikać z braku uwzględnienia w modelu podsystemu zasilenia podziemnego, kształtującego podstawę fali wezbraniowej, czego przyczyną jest zbyt mała gęstość sieci pomiarowej wód podziemnych.

**Tab. 4.** Miary dopasowania modelu *MIKE SHE* – wartości modelowanych do wartości pomierzonych

**Tab. 4.** *MIKE SHE* matching measures – modeled vs. measured values

Zlewnie modelowane	Biała/ Grybów	Solinka/ Terka	Skora/ Chojnów	Utrata/ Krubice	Rega/ Łobez
Czas symulacji	14.07.2001 – 30.07.2001	14.11.1992 – 25.11.1992	16.07.1981 – 01.08.1981	14.05.1962 – 15.06.1962	06.07.1996 – 24.07.1996
Współczynnik korelacji ( $R$ )	0,888	0,989	0,831	0,844	0,842
Średni błąd kwadratowy ( $RMSE$ )	17,828	26,434	23,642	12,686	3,714





**Rys. 9.** Symulacja odpływu po pomierzonym opadzie nawałnym: a) zlewnia Białej Tarnowskiej po profil Grybów od 14.07 do 30.07.2001 r., b) zlewnia Solinki po profil Terka od 14.11 do 25.11.1992 r., c) zlewnia Skory po profil Chojnów od 16.07 do 01.08.1981 r., d) zlewnia Utraty po profil Krubice od 16.05 do 15.06.1962 r., e) zlewnia Regi po profil Łobez od 06.07 do 24.07.1996 r.

**Fig. 9.** Simulation of the river runoff after storm rainfall (real data): a) Biała Tarnowska – Grybów river catchment 14.07 – 30.07.2001, b) Solinka – Terka river catchment 14.11 – 25.11.1992, c) Skora – Chojnów river catchment 16.07 – 01.08.1981, d) Utrata – Krubice river catchment 16.05 – 15.06.1962, e) Rega – Łobez river catchment 06.07 – 24.07.1996

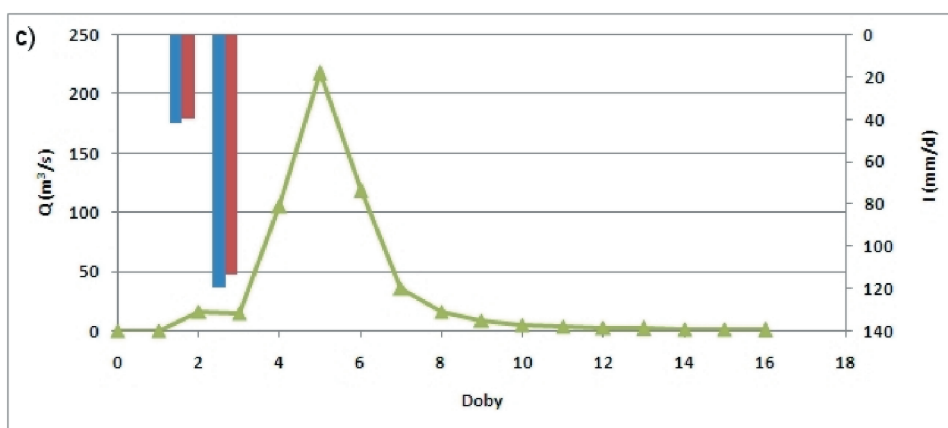
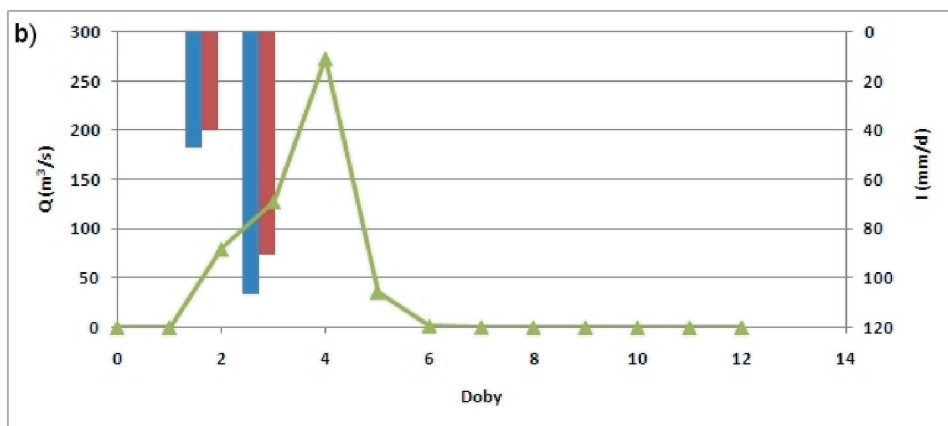
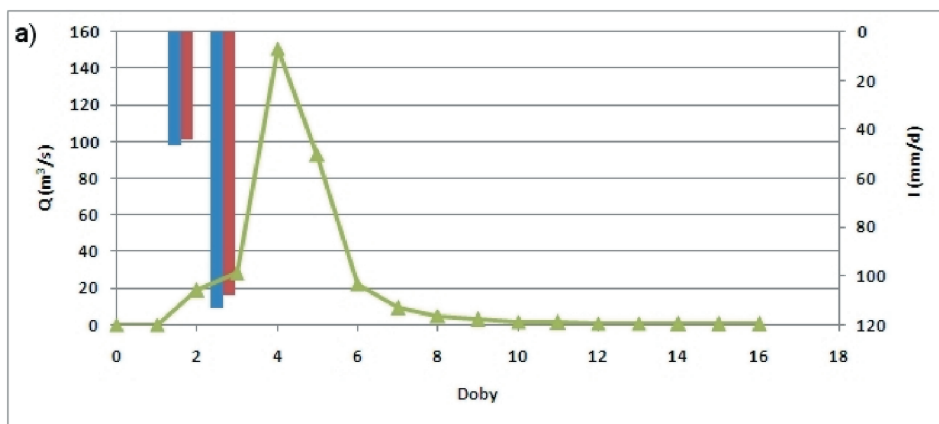
## II faza modelowania

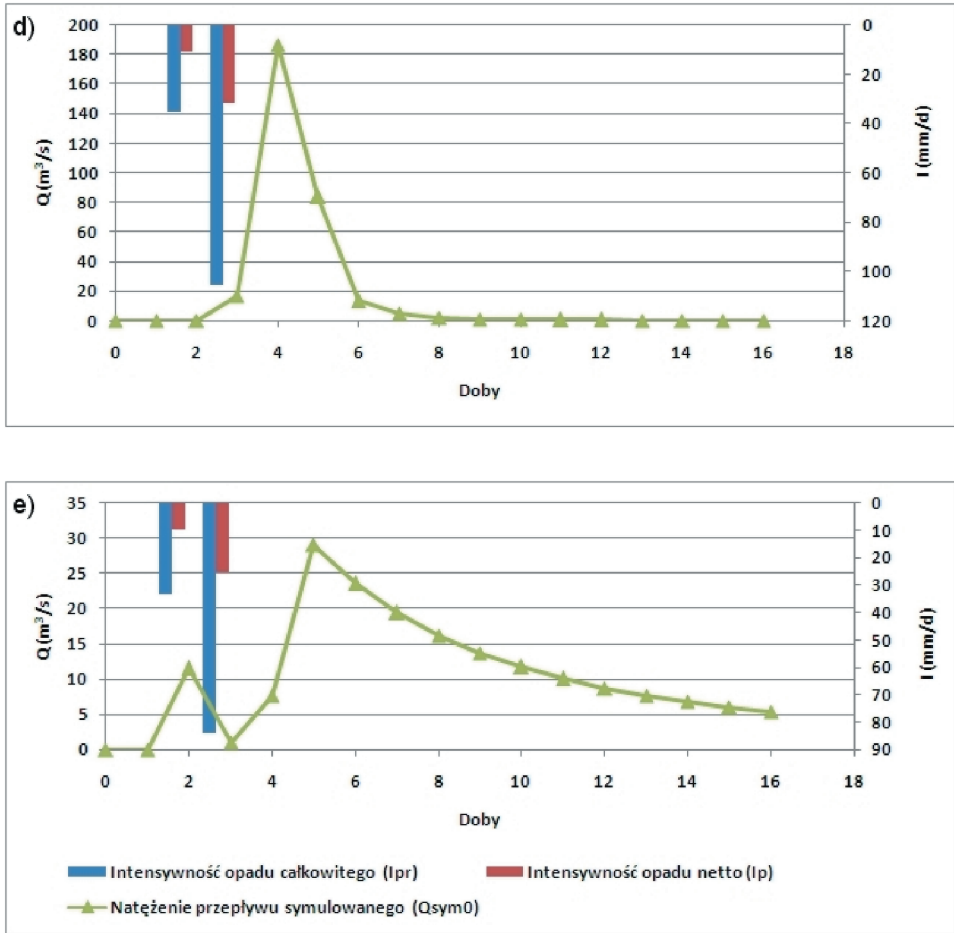
Druga faza modelowania polegała na uwzględnieniu ekstremalnie wysokiego wymuszenia opadowego  $P_{d1\%}$  ( $p=1\%$ ), wywołującego symulowaną falę wezbraniową (przy niezmiennych parametrach fizycznych modelu). Założono, że takie sumy opadów pojawiają się w drugiej dobie od początku symulacji i będą poprzedzone opadem o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p=50\%$  (rys. 10a – e). Sumy opadów  $P_{d1\%}$  o zadanym prawdopodobieństwie uzyskano na podstawie obliczeń A. Stacha (2007) w modelowanych obiektach (tab. 5). Przyjęto przybliżone założenie, że suma dobowego opadu o prawdopodobieństwie  $p=1\%$  ( $P_{d1\%}$ ) jest transformowana w zlewni w odpływ o takim samym prawdopodobieństwie. Uzyskane w wyniku symulacji wartości odpływu  $Q_{max0}$  w każdym przypadku przekraczają  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Wyjątek stanowi jeziorna zlewnia Regi (tab. 5, rys. 10e). Każdy z uzyskanych hydrogramów odpływu charakteryzuje się odmiennym kształtem. Utrata reaguje gwałtownie (stroma fala) z wyraźną kulminacją  $Q_{max0}$ , podobnie Solinka. Biała Tarnowska i Skora reagują szybko na opady nawalne, ale recesja krzywej opadania nie jest już tak gwałtowna. Skora osiąga kulminację wezbrania po najdłuższym czasie koncentracji, co jest spowodowane niesynchronizacją reakcji zlewni, początkowo w nizinnej części zlewni a potem w górskiej. Hydrogram odpływu Regi charakteryzuje znacznie dłuższy czas koncentracji fali oraz łagodniejszy kształt krzywej opadania, co wynika z jeziorności sprzyjającej dużej bezwładności (retencja) decydującej o różnicach przebiegu w czasie opadu całkowitego i efektywnego (netto). Podobna wydłużona reakcja charakteryzuje Utratę, co wynika z udziału retencji i dużego obszaru zlewni ( $>700 \text{ km}^2$ ).

Prawdopodobieństwo wystąpienia symulowanych wartości odpływu wezbraniowego  $Q_{max0}$  uzyskanych w wyniku transformacji założonego impulsu opadowego  $P_{d1\%}$  trwającego 24 godz. o prawdopodobieństwie  $p=1\%$  w większości przypadków jest mniejsze niż  $1\%$ , z wyjątkiem Solinki (prawdopodobieństwo zbliżone). Czas koncentracji fal wezbraniowych wszystkich modelowanych przypadków jest zbliżony do 1 – 2 dób (Solinka, Biała, Utrata – 1, Skora, Rega – 2). Symulowany przepływ maksymalny prawdopodobny  $Q_{max0}$  wszystkich rzek uzyskuje wartości wyższe od dotychczas pomierzonych  $Q_{maxrz}$ . Najbardziej zbliżone do pomierzonych  $Q_{maxrz}$  natężenie przepływu  $Q_{max0}$  uzyskano w wyniku symulacji w zlewniach Białej Tarnowskiej i Solinki. W pozostałych zlewniach różnice są znaczne, co przy założeniach modelowania (2 doby opadu; w pierwszej dobie suma o  $p=50\%$ , w drugiej o  $p=1\%$ ) świadczy o tym, że w przypadku Utraty, Skory i Regi nie tylko natężenie opadu, ale i odpowiednio długi czas jego trwania mają istotny wpływ na wysokość kulminacji wezbrania.

**Tab. 5.** Wyniki symulacji  $Q_{\max}$  w czterech fazach**Tab. 5.** Results of peak river discharge  $Q_{\max}$  simulation in four approaches

	Parametr	Zlewnie					
		Biała/ Gry- bów	Solin- ka/ Terka	Skora/ Choj- nów	Utrata/ Krubi- ce	Rega/ Łobez	
I faza	Maksymalna suma dobowa opadów zmierzonych $P$ (mm) i prawdopodobieństwo jej wystąpienia (%)	(mm)	74,8	95,0	124,0	91,0	78,0
		$p$ (%)	2,0	0,5	0,1	0,5	1,5
	Maksymalny przepływ symulowany $Q_{\max\text{sym}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) i prawdopodobieństwo jego przekroczenia (%)	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	84,5	176,8	136,8	103,8	22,0
		$p$ (%)	25,0	12,0	0,02	0,4	2,0
	Maksymalny przepływ zmierzony $Q_{\max\text{rz}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) i prawdopodobieństwo jego przekroczenia (%)	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	129,0	254,0	180,0	80,1	16,4
		$p$ (%)	9,0	2,0	0,1	0,7	18,0
II faza	Średnia maksymalna suma dobowa opadów $P_{d1\%}$ o $p=1\%$	(mm)	113,3	106,8	119,6	105,4	84,1
	Maksymalny symulowany przepływ $Q_{\max0}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) wywołany opadem dobowym $P_{d1\%}$ o $p=1\%$ i prawdopodobieństwo jego przekroczenia (%)	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	151,0	273,2	217,7	186,4	29,1
		$p$ (%)	4,0	1,5	0,1	0,09	0,1
III faza	Średnia maksymalna suma dobowa opadów $P_{d1\%}$ o $p=1\%$ prognozowana na lata 2046 – 2065	(mm)	81,1	77,3	64,2	66,2	61,8
	Maksymalny symulowany przepływ $Q_{\max1}$ wywołany opadem dobowym $P_{d1\%}$ o $p=1\%$	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	111,3	208,6	50,1	68,8	11,7
IV faza	Średnia maksymalna suma dobowa opadów $P_{d1\%}$ o $p=1\%$ prognozowana na lata 2081 – 2100	(mm)	111,0	115,3	65,9	86,4	72,9
	Maksymalny symulowany przepływ $Q_{\max2}$ wywołany opadem dobowym $P_{d1\%}$ o $p=1\%$	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	176,9	311,1	51,7	138,9	15,1





**Rys. 10.** Wyniki symulacji odpływu wywołanego opadem dobowym  $P_{d1\%}$  o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p=1\%$  obliczonym na podstawie danych z wielolecia 1956 – 1980 a) zlewnia Białej Tarnowskiej po profil Grybów, b) zlewnia Solinki po profil Terka, c) zlewnia Skory po profil Chojnów, d) zlewnia Utraty po profil Krubice, e) zlewnia Regi po profil Łobez

**Fig. 10.** Results of river runoff simulation after 1% precipitation total estimated for period 1956 – 1980 a) Biała Tarnowska river at Grybów, b) Solinka river at Terka, c) Skora river at Chojnów, d) Utrata river at Krubice, e) Rega river at Łobez



### III i IV faza modelowania

W trzeciej i czwartej fazie modelowania, wygenerowany impuls opadowy (sumy dobowe) służący prognozie długookresowej pochodził z modelu *ECHAM4* przy założonym scenariuszu rozwoju *SRES1b* zakładającym stabilizację stężenia  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Z baz danych projektów „Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison” (PCMDI) i „The World Climate Research Program’s (WCRP’s) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3)”, udostępnionych przez Departament Energii USA zostały pobrane pliki zawierające dane opadowe w formacie NetCDF. Dane poddano selekcji za pomocą programu IDV (Integrated Data Viewer) firmy Unidata. W punktach stanowiących środki ciężkości modelowanych zlewni odczytano wygenerowane serie danych pluwiograficznych w kolejnych 20 prognozowanych latach 2046 – 2065 oraz 2081 – 2100. Z tych danych wybrano maksymalne roczne sumy dobowe opadów. Na ich podstawie zostały oszacowane dobowe sumy opadów  $P_{d1\%}$  o prawdopodobieństwie przekroczenia  $p=1\%$ . Dobór rozkładów prawdopodobieństwa i krzywych maksymalnych rocznych sum dobowych opadu w 5 zlewniach modelowanych został dokonany na podstawie metodyki zawartej w *Guidelines for Flood Frequency Analysis...* (2005) według następujących procedur:

- analiza jednorodności ciągów opadowych uzyskiwana
  - testem Grubbsa-Becka na istnienie elementów odstających i niezależność danych;
  - testami Kruskala-Wallisa i korelacji rangowej Spearmana na stacjonarność ciągu danych;
- przeprowadzenie procedury doboru najlepszego rozkładu prawdopodobieństwa na poziomie istotności  $\alpha=0,05$  z czterech rozkładów: gamma, Weibulla, logarytmicznego normalnego i logarytmicznego gamma.

W świetle otrzymanych wyników zwracają uwagę znacznie niższe wartości sum dobowych opadów  $P_{d1\%}$  o prawdopodobieństwie  $p=1\%$ . Jak wynika z prognozy długoterminowej otrzymanej z modelu *ECHAM4*, sumy opadów  $P_{d1\%}$  będą niższe niż analogiczne wartości obliczone z ciągów obejmujących lata 1956 – 1980 i wykorzystanych przez A. Stacha (2007), co pokazano w tabeli 5. Wyjątek stanowi zlewnia Solinki w latach 2081 – 2100. Należy zaznaczyć, że zawsze suma opadów dobowych  $P_{d1\%}$  o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p=1\%$  jest niższa w 20leciu 2046 – 2065 od 20lecia 2085 – 2100. W konsekwencji, symulowana reakcja zlewni na opad prawdopodobny  $P_{d1\%}$  o czasie trwania 24 h jest wg prognozy długoterminowej na 2 połowę XXI wieku znacznie mniejsza, niż to wynika z opadów i wezbrań historycznych. Kształty symulowanych hydrogramów przepływu są podobne do uzyskanych na podstawie archiwalnych danych pomiarowych, jak i syntetycznych z 24lecia 1956 – 1980. Ponownie

zwraca uwagę znacznie spłaszczony kształt hydrogramu Regi oraz bardzo stromy kształt hydrogramów Białej i Solinki (rys. 11a–11e). Niemniej można stwierdzić, że czasy trwania przepływów wysokich (>98%), zwłaszcza  $Q_{\max}$  są zdecydowanie wyższe, podczas symulacji uwzględniającej inne scenariusze np.  $2 \times \text{CO}_2$

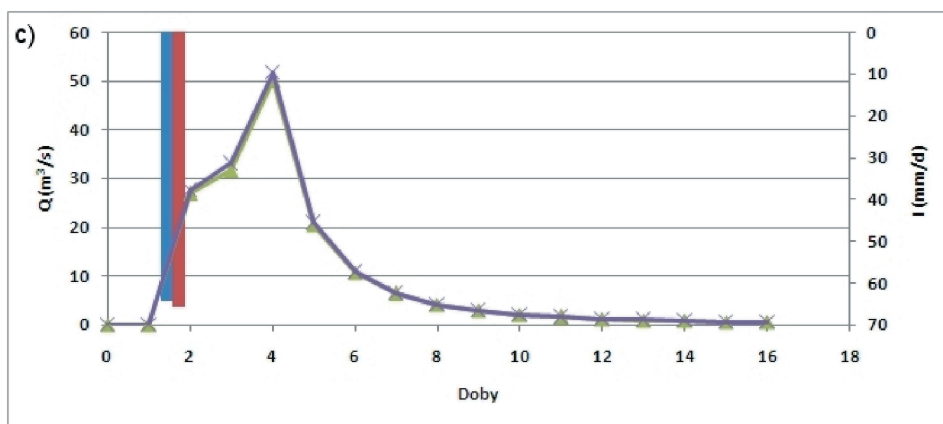
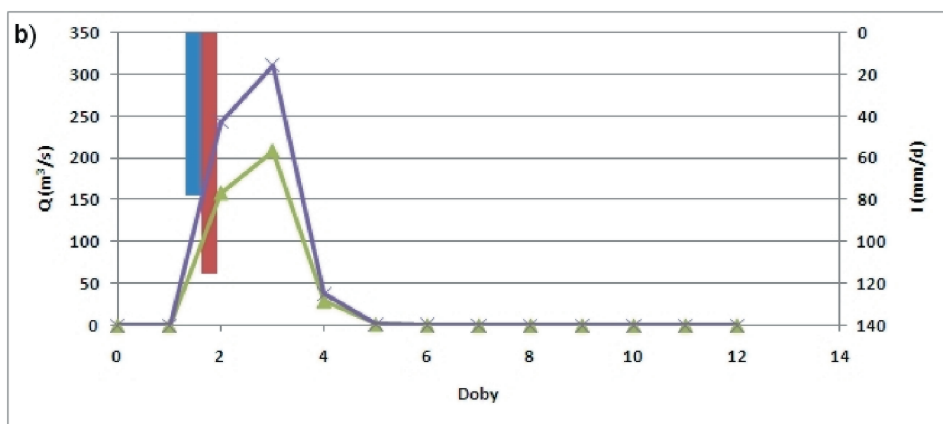
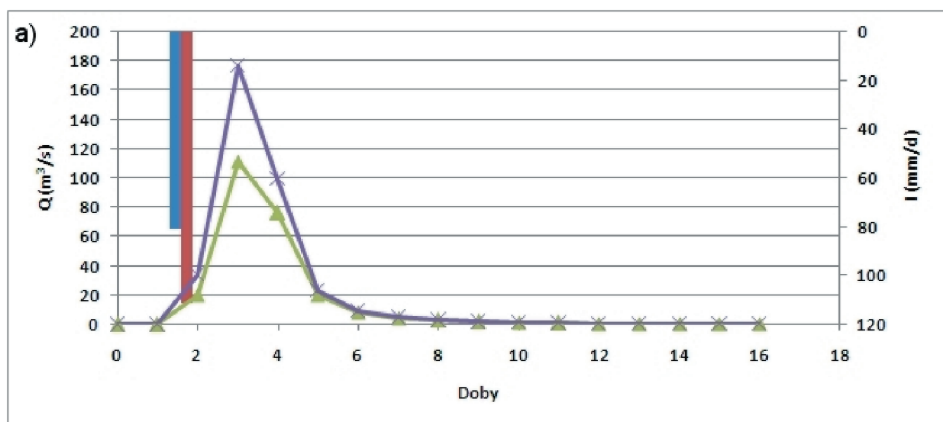
Zwiększenie  $Q_{\max}$  o 66% wskazuje na rozchwianie się ustroju hydrologicznego i zwiększenie prawdopodobieństwa występowania  $Q_{\max}$ , co wyraża się wzrostem częstości występowania przepływów wysokich  $Q > 100 \text{ m}^3/\text{s}$  o 12%. Największy spadek  $Q_{\max}$  może wystąpić wiosną ze względu na ograniczenie roztopów.

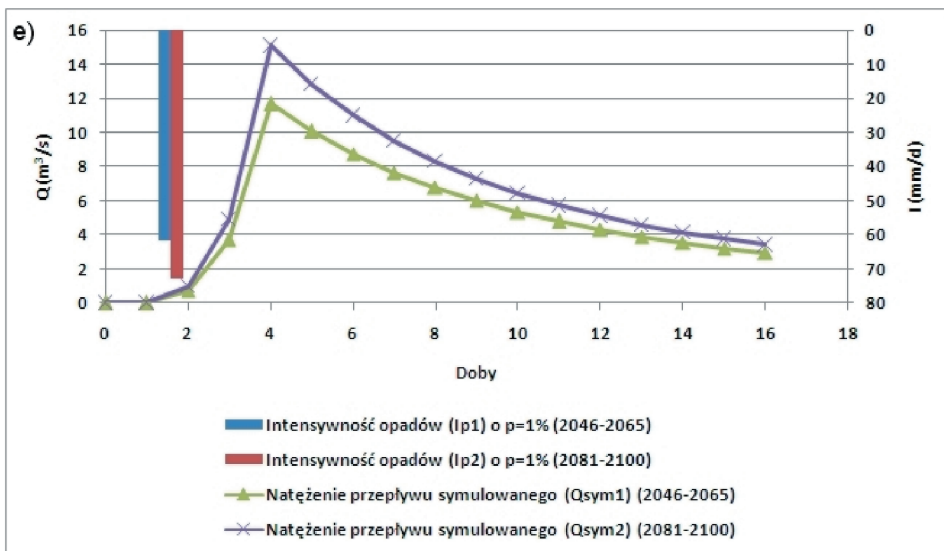
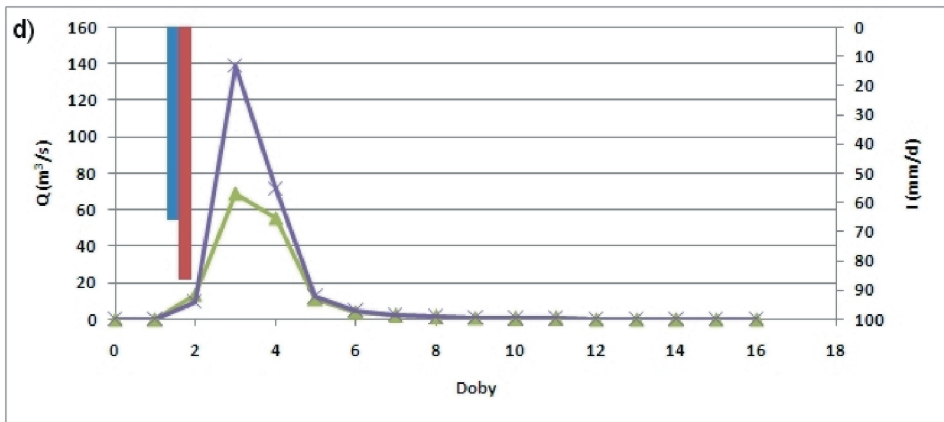
## PODSUMOWANIE

Zmiany klimatu wywołane globalnym ociepleniem zostały opisane jako łańcuch wzajemnych oddziaływań z pojedynczymi sprzężeniami zwrotnymi. Zmiany te wywołują następstwa w postaci występowania ekstremalnych stanów pogody, zwłaszcza natężenia opadów, a przez to zwiększenia dynamiki cyklu hydrologicznego w konsekwencji odpływu rzek.

Do oszacowania zmian przebiegu wezbrania w zlewni wywołanych zmianą sum dobowych opadów  $P$ , wykorzystano symulację modelem hydrologicznym. Model hydrologiczny skalibrowano w zlewni pilotażowej na materiale niezależnym, reprezentującym warunki rzeczywiste.

Porównanie średniego dobowego natężenia przepływu w przekroju kontrolowanym rzeki obliczonego na podstawie danych archiwalnych i uzyskanych w wyniku symulacji z modelu *MIKE SHE* oraz symulowanych z modelu *ECHAM4* wykazuje wystarczająco dobrą zgodność. W przypadku wybranego scenariusza *SRES1b* (stabilizacja rozwoju gospodarczego) wystąpiło istotne zmniejszenie od 10% do 65% wartości natężenia przepływu maksymalnego modelowanych rzek. Analizując wyniki symulacji należy brać pod uwagę element niepewności, który wynika z rozdzielczości modelu *ECHAM4*. Sprawiała ona, że uwzględnienie zmienności pola opadu w modelowanych zlewniach nie było możliwe. Co więcej nie uwzględnia ona opadów o ekstremalnie wysokim natężeniu, będącym wynikiem tworzenia się lokalnych komórek i superkomórek burzowych. Model *ECHAM4*, jako model globalny uwzględnia raczej opady makroskalowe. Uzyskane przez nas wyniki odbiegają od wcześniejszych projekcji realizowanych na polskich rzekach. Symulacje przeprowadzone przez A. Mućkę (2000) w górskim dorzeczu Nysy Kłodzkiej w profilu Bardo Śląskie udowodniły, że w wyniku globalnego ocieplenia nastąpi obniżenie o 41% odpływu powierzchniowego, natomiast odchylenie standardowe tego odpływu wzrośnie o 18%. Oznacza to wzrost częstotliwości występowania zdarzeń ekstremalnych, zwłaszcza powodziowych. W świetle wyników uzyskanych przez A. Mućkę (2000),





**Rys. 11.** Wyniki symulacji odpływu wywołanego opadem dobowym  $P_{d1\%}$  o prawdopodobieństwie  $p=1\%$  obliczonym z modelu *ECHAM4*, predykcja na lata 2046 – 2065 i 2081 – 2100 a) zlewnia Białej Tarnowskiej po profil Grybów, b) zlewnia Solinki po profil Terka, c) zlewnia Skory po profil Chojnów, d) zlewnia Utraty po profil Krubice, e) zlewnia Regi po profil Łobez

**Fig. 11.** Results of river runoff simulation after estimated 1% daily precipitation total based at prediction of *ECHAM4* GCM model for 2046 – 2065 and 2081 – 2100 a) Biała Tarnowska river at Grybów, b) Solinka river at Terka, c) Skora river at Chojnów, d) Utrata river at Krubice, e) Rega river at Łobez

odpływ maksymalny zwiększy się o 66% a powierzchniowy o 56%, co potwierdza dużą wrażliwość na wzrost koncentracji gazów szklarniowych.

## WNIOSKI

Jak wynika z symulacji reakcji zlewni na opady nawalne, zdarzające się raz na 100 lat, oszacowane z danych pomiarowych obejmujących lata 1956 – 1980 i z danych wygenerowanych przez model *ECHAM4*, określający prognozę parametrów klimatycznych na lata 2046 – 2065 oraz 2081 – 2100, w perspektywie około 80 – 90 lat, jedynie w karpackich zlewniach górskich (Biała, Solinka) można spodziewać się wezbrań opadowych, które będą przewyższały dotąd obserwowane (tab. 6). W zlewni Skory kulminacje wezbrań wywołanych impulsem opadowym o prawdopodobieństwie  $p = 1\%$  będą być może o połowę mniejsze niż w latach 1956 – 1980. W zlewni Utraty i Regi natomiast osiągną jedynie około 70 – 80% wymienionych wartości. Zmniejszenie odpływu może być wywołane obniżeniem opadów nawalnych, co szczególnie jest widoczne w prognozach dotyczących nizin środkowych i północno-zachodnich, z wyłączeniem obszarów górskich. Dotyczy to szczególnie najniższych partii łańcucha Karpat, gdzie przepływ wilgotnych mas powietrza z południa może zachodzić najczęściej. Nysa Kłodzka w profilu Bardo Kłodzkie analizowana przez A. Mućkę (2000) reaguje na zmiany opadów w innym kierunku mimo, że przyjęto założenie niezmienności równań i parametrów zlewni również w warunkach projekcji.

Postawiona prognoza potwierdzająca zmniejszenie kulminacji wezbrań jest zgodna z badaniami brytyjskimi (Thomson i in., 2008) i japońskimi (Hirabayashi i in., 2008). Istotne różnice prognozy odpływu mogą wynikać z wyboru różnych podejść do modelowania, przebiegającego według odrębnych scenariuszy rozwoju ekonomicznego stosowanych do Globalnych Modeli Cyrkulacji Atmosfery. Obliczenia na podstawie bardziej „agresywnego” scenariusza mogą wykazać inne tendencje np. w kierunku większej częstotliwości pojawiania się opadów nawalnych, a tym samym wezbrań i powodzi. Być może wybrany model *ECHAM4* niedokładnie odzwierciedla proces konwekcyjnego tworzenia się komórek i superkomórek burzowych, które są odpowiedzialne za ekstremalne opady nawalne w skali lokalnej, a niekiedy nawet regionalnej. W dłuższej perspektywie czasu można spodziewać się, że przepływy maksymalne  $Q_{\max}$  rzek mogą zarówno wzrosnąć, jak też zmaleć, co wynika z wielu przyczyn, zwłaszcza niedokładności metod estymacji, słabej rozdzielczości czasowej i przestrzennej oraz niepewności danych pomiarowych.

**Tab. 6** Porównanie symulacji przepływów maksymalnych  $Q_{\max}$  wywołanych opadem dobowym o prawdopodobieństwie  $p=1\%$  obliczonym z wielolecia 1956–1980 oraz opadami z projekcji od 2046 do 2065, od 2081 do 2100

**Tab. 6.** Comparison of peak river discharge  $Q_{\max}$  simulation after estimated 1% daily precipitation total based at 1956–1980 real data and predictions for 2046–2065 and 2081–2100

Przepływ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Biała/ Grybów	Solinka/ Terka	Skora/ Chojnów	Utrata/ Krubice	Rega/ Łobez
$Q_{\max rz}$	129,0	254,0	180,0	80,1	16,4
$Q_{\max sym}$	84,5	176,8	136,8	103,8	22,0
$Q_{\max sym} / Q_{\max 0}$	0,68	0,61	1,22	0,53	1,22
$Q_{\max 0}$ (1956–1980)	124,0	288,2	111,8	195,2	18,1
$Q_{\max 1}$ (2046–2065)	111,3	208,6	50,1	68,8	11,7
$Q_{\max 1} / Q_{\max 0}$	0,90	0,72	0,45	0,35	0,64
$Q_{\max 2}$ (2081–2100)	176,9	311,1	51,7	138,9	15,1
$Q_{\max 2} / Q_{\max 0}$	1,43	1,08	0,46	0,71	0,83

$Q_{\max rz}$  – przepływ pomierzony stanowiący kulminację fali wezbraniowej, na której kalibrowano model,

$Q_{\max sym}$  – przepływ obliczony stanowiący kulminację symulowanej w wyniku kalibracji modelu fali wezbraniowej,

$Q_{\max 0}$  – przepływ stanowiący kulminację fali wezbraniowej stanowiącej reakcję zlewni na opad o prawdopodobieństwie wystąpienia 1 % w okresie 1956 – 1980,

$Q_{\max 1}$  – przepływ stanowiący kulminację fali wezbraniowej stanowiącej reakcję zlewni na opad o prawdopodobieństwie wystąpienia 1 % w okresie 2046 – 2065 (na podstawie danych prognozowanych przez model GCM *ECHAM4* z uwzględnieniem scenariusza *SRES1b*),

$Q_{\max 2}$  – przepływ stanowiący kulminację fali wezbraniowej stanowiącej reakcję zlewni na opad o prawdopodobieństwie wystąpienia 1 % w okresie 2081 – 2100 (na podstawie danych prognozowanych przez model GCM *ECHAM4* z uwzględnieniem scenariusza *SRES1b*).

### Podziękowania

Autorzy pragną podziękować grupom naukowców pracującym w ramach „Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison” (*PCMDI*) oraz „WCRP’s Working Group on Coupled Modelling” (*WGCM*) za ich wkład w opracowanie i udostępnienie danych stanowiących porównanie wyników projekcji zmian klimatu pochodzących z wielu Globalnych Modeli Cykulacji

Atmosfery (WCRP CMIP3 multi-model dataset). Opracowanie i utrzymanie bazy danych było możliwe dzięki wsparciu Office of Science, Departamentu Energii USA.

## Literatura

- Atlas posterunków wodowskazowych dla potrzeb Państwowego Monitoringu Środowiska*, 1995, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa-Katowice.
- Ciołkosz A., Bielecka E., 2005, *Pokrycie terenu w Polsce. Bazy danych CORINE Land Cover*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Eckhardt K., Ulbrich U., 2003, Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range, *Journal of Hydrology* 284, 244–252.
- Graham D.N., Butts M.B., 2005, Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. [w:] Singh V. P., Frevert D.K. (red.), *Watershed models*. CRC, Boca Raton, 245–272.
- Guidelines for Flood Frequency Analysis. Long measurements series of river discharge*. 2005. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Gutry-Korycka M. (red.), 1996, *Studia nad wpływem globalnych zmian klimatu na obieg wody w zlewni*, Wyd. WGSR UW, Warszawa, s. 184.
- Hirabayashi Y., Kenae S., Emori S., Oki T., Kimoto M., 2008, Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climates, *Hydrological Sciences Journal*, 53 (4), VIII, IAHS, 754–772.
- IPCC, 2000, *Special report on emissions scenarios (SRES): a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2007, *Climate change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaczmarek Z. (red.), 1996, *Wpływ niestacjonarności globalnych procesów geofizycznych na zasoby wodne Polski*, Monografie KGW PAN, z. 12, Oficyna Wyd. PW, Warszawa, s. 96.
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Kundzewicz Z.W., 2008, Hydrological extremes in the changing world, *Folia Geographica Physica*, vol. 39, 37–52.
- Kundzewicz Z.W., Graczyk D., Maurer T., Pińskwar I., Radziejewski M., Svensson C., Szwed M., 2005, Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow, *Hydrol. Sci. J.* 50 (5), 797–810.
- Kundzewicz Z.W., Radziejewski M. (red.), 2002, *Detekcja zmian klimatu i procesów hydrologicznych*, ZBŚRiL PAN, Wyd. SURUS, Poznań.
- Mapa Podziału Hydrograficznego Polski*, 2004, Zakład Zasobów Wodnych IMGW, KZGW, Warszawa.

- Middelkoop H., Parmet B., 1998, Assessment of the impact of climate change on peak flows in the Netherlands – a matter of scale, [w:] Lemellä R., Helenius N. (red.), *Proceedings of the second international conference on climate and water*, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 20–33.
- MIKE SHE, *An Integrated Hydrological Modelling System. User Guide*, 2004, DHI, Denmark.
- Milly P.C.D., Wetherald R.T., Dunne K.A., Delworth T.L., 2002, Increasing risks of great flood in a changing climate, *Nature*, 415, 514–517.
- Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A., 1999, Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 98–99, 257–277.
- Mućka A., 2000, *Modelowanie wpływu zmian klimatu na proces odpływu i zasoby wodne zlewni*, Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW, Warszawa.
- Nakićenović N., Swart R., (red.) 2000, *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Refsgaard J.C., Storm B., 1995, MIKE SHE. [w:] Singh V. P. (red.), *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Englewood, 809–846.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Brinkop S., Dümenil L., Esch M., Kirk E., Lunkeit F., Ponater M., Rockel B., Suasen R., Schlese U., Schubert S., Windelband M., 1992, *Simulation of the present-day climate with the ECHAM4 model: impact of model physics and resolution* Max-Planck Institute for Meteorology, Report No.93, Hamburg.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Christoph M., Claussen M., Dümenil L., Esch M., Giorgetta M., Schlese U., Schulzweida U., 1996, *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate*, Max-Planck Institute for Meteorology, Report No.218, Hamburg.
- Soczyńska U. (red.), 1997, *Hydrologia dynamiczna*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Stach A., 2007, Zmienność czasowa struktury przestrzennej maksymalnych sum dobowych opadów. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, nr 8, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce, 73–90.
- Thompson J.R., Gavin H., Refsgaard A., Refstrup Sørensen H., Gowing, D. J., 2008, Modelling the hydrological impacts of climate change on UK lowland wet grassland, *Wetlands Ecol. Manage.*, Springer, DOI 10.1007/s11273-008-9127-1.
- Thompson J.R., Refstrup Sørensen H., Gavin H., Refsgaard A., 2004, Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England, *Journal of Hydrology*, 293, 151–179.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1972, *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*, Chapters 4–10.
- U.S. Soil Conservation Service, 1986, *Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds*, U.S. Department of Agriculture.