

ZASTOSOWANIE GEOMORFOKLIMATYCZNEGO CHWILOWEGO HYDROGRAMU JEDNOSTKOWEGO CLARKA DO SYMULACJI WEZBRAŃ OPADOWYCH

USE OF CLARK'S GEOMORFOCLIMATICS INSTANTANEOUS UNIT HYDROGRAPH FOR SIMULATION OF RUNOFF

Andrzej Wałęga, Agnieszka Cupak

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Celem artykułu jest ocena możliwości zastosowania geomorfoklimatycznego chwilowego hydrogramu jednostkowego opartego na modelu GcIUH-Clark do symulacji wezbrań opadowych. Wyniki uzyskane ze wspomnianego modelu zostały porównane z klasycznym modelem chwilowego hydrogramu jednostkowego Clarka IUH Clark. Analizę przeprowadzono dla dwóch epizodów typu opad–odpływ zanotowanych w przekroju wodowskazowym Godowa na rzece Stobnica. Wszystkie symulacje zostały wykonane w programie HEC-HMS 3.4. Analizy wykazały przydatność modelu GcIUH-Clark do symulacji wezbrań opadowych, aczkolwiek nieco lepszą ocenę uzyskał klasyczny model IUH Clarka. Ze względu na to, że parametry GcIUH-Clark zależą od charakterystyk geomorfoklimatycznych zlewni, model ten może być stosowany do symulacji wezbrań w zlewniach niekontrolowanych.

Abstract. The aim of the paper was to evaluate the possibility of use a geomorfoclimatics instantaneous unit hydrograph based on Clark's model GcIUH-Clark for simulation of runoff. Results got from the model were compared with classical Clark's instantaneous unit hydrograph IUH Clark. The analysis were made for two rainfall-runoff episodes which were recorded in Godowa gauging station on Stobnica river. All simulations were made with use of HEC-HMS 3.4 application. The analysis showed usefulness of GcIUH Clark's model for simulation of runoff, but better results were got from classic IUH Clark's model. Because of the fact that GcIUH-Clark parameters of catchment depend on geomorfoclimatics characteristics, this model could be used for flood simulation in uncontrolled catchments.

Słowa kluczowe: chwilowy hydrogram jednostkowy IUH Clarka, geomorfoklimatyczny chwilowy hydrogram jednostkowy GcIUH-Clark, efektywność modeli, symulacja

Key words: Clark instantaneous unit hydrograph IUH, Clark geomorfoclimatics unit hydrograph GcIUH, model efficiency, simulation

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Andrzej Wałęga, dr inż. Agnieszka Cupak, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: a.walega@ur.krakow.pl.

WSTĘP

Mimo ciągłej rozbudowy systemu osłony hydrometeorologicznej znaczna liczba zlewni, zwłaszcza małych, jest wciąż niekontrolowana, a więc nie ma zarejestrowanych długoletnich ciągów pomiarowych opadów i przepływów. W celu realizacji inwestycji hydrotechnicznych oraz związanych z ochroną przeciwpowodziową w takich zlewniach niezbędne jest pozyskanie danych hydrologicznych metodami pośrednimi. Mimo że do celów projektowych często wystarcza znajomość samego przepływu w kulminacji, to jednak hydrogram jest pomocny w weryfikacji założeń projektowych i warunków eksploatacji wybudowanych obiektów czy w projektowaniu stref zagrożenia powodziowego. Do powszechnie stosowanych na świecie metod obliczania hydrogramów odpływu należą modele hydrologiczne typu opad–odpływ, pozwalające na symulacje odpływu ze zlewni przy różnych scenariuszach opadowych i charakterystykach zlewni. W przypadku zlewni niekontrolowanych nierzadko stosowane są tzw. syntetyczne hydrogramy jednostkowe, których parametry zależą od charakterystyk zlewni [Bhunya i in. 2007]. Częstym podejściem w modelowaniu odpływu ze zlewni jest wykorzystanie praw sieci rzecznej Hortona-Strachlera w tzw. geomorfologicznym chwilowym hydrogramie jednostkowym (GUIH), obszernie opisywanym m.in. przez Rodríguez-Iturbe i Valdés [1979] czy Gupta i in. [1980]. W praktyce do opisu hydrogramu odpływu bezpośredniego z parametrami określonymi na podstawie GUIH wykorzystuje się często prosty model Nasha w postaci kaskady zbiorników liniowych, rzadziej zaś chwilowy hydrogram jednostkowy Clarka [Kumar i in. 2002, Sahoo i in. 2006]. Badania nad zastosowaniem geomorfologicznych hydrogramów jednostkowych do symulacji wezbrań opisane są także w pracach Sormana [1995] oraz Yen i Lee [1997]. Kumar i Kumar [2008] stwierdzili, że geomorfologiczny chwilowy hydrogram jednostkowy oparty na teorii fali kinematycznej i geomorfologicznych prawach sieci rzecznej Hortona dobrze odzwierciedla wezbrania w zlewniach górskich. Spotykana jest też rozszerzona modyfikacja GUIH, która wykorzystuje dodatkowo informacje o hietogramie opadu efektywnego, znana jako geomorfoklimatyczny chwilowy hydrogram jednostkowy GcIUH [Rodríguez-Iturbe i in. 1982].

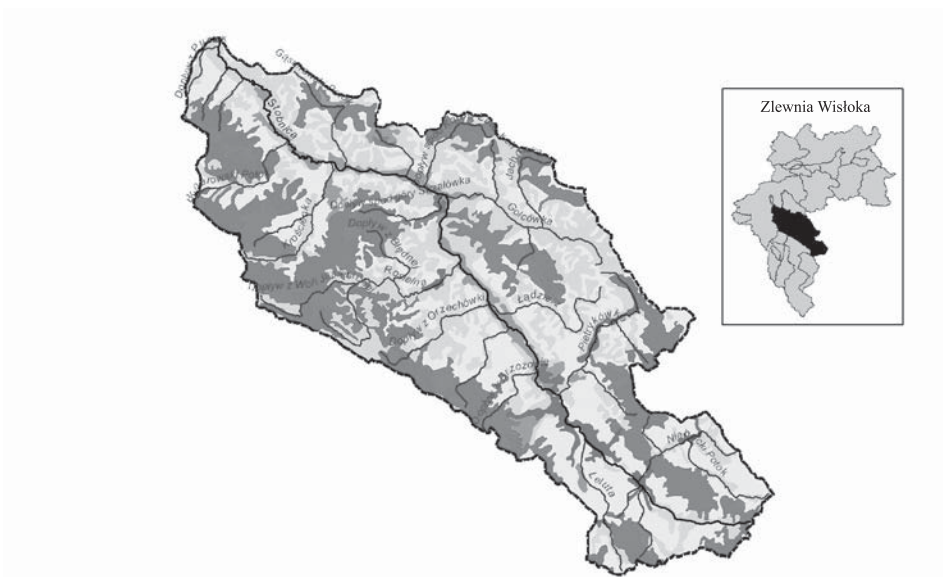
Celem pracy jest ocena możliwości zastosowania w warunkach polskich geomorfoklimatycznego chwilowego hydrogramu jednostkowego GcIUH-Clark opartego na modelu Clarka do symulacji wezbrań opadowych.

OBSZAR BADAŃ I METODY

Badania przeprowadzono w zlewni Stobnicy – prawostronnego dopływu Wisłoka (rys. 1). Powierzchnia zlewni wynosi 335,84 km², długość cieków głównego 47,319 km, a średni spadek zlewni 0,78%.

Zlewnia leży na Pogórzu Dynowskim [Kondracki 2009]. Dominują w niej gleby średnio i słabo przepuszczalne. Teren pokrywają w głównej mierze grunty orne i lasy [Wałęga i in. 2009].

Geomorfologiczna analiza zlewni obejmowała określenie rzędu cieków wg klasyfikacji Hortona-Strachlera oraz obliczenia wskaźników bifurkacji (*RB*), długości cieków (*RL*) i powierzchni zlewni (*RA*). Szczegółowy opis obliczania tych wskaźników znaleźć można w pracy m.in. Pociask-Karteczki [2006]. W tab. 1 zestawiono wielkości wspomnianych wskaźników dla przyrastających rzędów cieków oraz ich wartość średnią.



Rys. 1. Zlewnia Stobnicy [Wałęga i in. 2009]

Fig. 1. Stobnica catchment [Wałęga et al. 2009]

Tabela 1. Wskaźniki Hortonona dla cieków różnych rzędów w zlewni Stobnicy

Table 1. Hortonian law for different streams order in Stobnica catchment

Wskaźniki Hortonona Hortonian law	Rząd cieków – Order of streams			Średnia Mean
	1	2	3	
<i>RB</i>	6,00	5,00	–	5,50
<i>RL</i>	–	2,51	5,28	3,90
<i>RA</i>	–	4,57	12,29	8,43

RB – wskaźnik bifurkacji – bifurcation ratio; *RL* – wskaźnik długości cieków – length of stream ratio; *RA* – wskaźnik powierzchni zlewni – areas of stream ratio

W obliczeniach praw sieci rzecznej posłużono się Mapą podziału hydrograficznego Polski [MPHP 2005]; okazało się, że w zlewni Stobnicy średnia wartość *RB* wynosi 5,50, *RL* jest równe 3,90, a wskaźnik *RA* to 8,43. Stosunek $RB/RA = 0,65$, jest typowy dla zlewni naturalnych. Transformację opadu efektywnego w odpływ dokonano, opierając się na modelu IUH Clarka. Podstawą tego modelu jest zależność między czasem koncentracji a powierzchnią zlewni oraz wykorzystanie teorii zbiornika liniowego do transformacji opadu efektywnego w odpływ. Mimo że powierzchnia zlewni jest znaczna, to jednak zdecydowano się na zastosowanie teorii zbiornika liniowego, ponieważ opad deszczu, który uwzględniono w analizie, równomiernie pokrywał całą zlewnię. W związku z tym przyjęto założenie, że największy odpływ wystąpi po czasie opadu równym czasowi koncentracji. W przypadku opadu o czasie trwania dłuższym niż czas koncentracji (taki miał miejsce w przypadku omawianych epizodów) odpływ będzie utrzymywał się na

stałym poziomie aż do zmiany natężenia opadu. Hydrogram jednostkowy Clarka stanowi próbę powiązania charakterystyk geomorfologicznych zlewni z jej reakcją na opad [Cleveland i in. 2008]. Matematyczny zapis chwilowego hydrogramu jednostkowego według Clarka [1945] jest następujący:

$$u_i = \left(\frac{\Delta t}{R + 0,5\Delta t} \right) \cdot I_i + \left(\frac{R - 0,5\Delta t}{R + 0,5\Delta t} \right) \cdot u_{i-1} \quad (1)$$

gdzie:

- u_i, u_{i-1} – wartości chwilowego hydrogramu jednostkowego,
- Δt – krok czasowy, h,
- R – współczynnik retencji, h,
- I_i – i -ta rzędna krzywej: czas koncentracji – powierzchnia zlewni.

Symulacje przeprowadzono w programie HEC-HMS 3.4 [Hydrologic... 2009], w którym tworzona jest syntetyczna krzywa zależności między czasem koncentracji a powierzchnią zlewni. Parametry modelu IUH Clark'a (T_c – czas koncentracji, R – współczynnik retencji) określono na drodze optymalizacji, tak aby uzyskać najlepszą zgodność obliczonego i obserwowanego hydrogramu.

W przypadku geomorfoklimatycznego chwilowego hydrogramu jednostkowego Clarka GcIUH-Clark, przepływ w kulminacji odpływu bezpośredniego został ustalony z zależności [Adib i in. 2010]:

$$Q_p = 2,42 \cdot \frac{i_r \cdot A_\Omega \cdot t_r}{\Pi^{0,4}} \cdot \left(1 - \frac{0,218 \cdot t_r}{\Pi^{0,4}} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- Q_p – przepływ w kulminacji hydrogramu odpływu bezpośredniego, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- i_r – natężenie opadu efektywnego, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,
- A_Ω – powierzchnia zlewni najwyższego rzędu, km^2 ,
- t_r – czas trwania opadu efektywnego, h,
- Π – parametr geomorfoklimatyczny, h.

Parametr geomorfoklimatyczny Π jest obliczany z zależności:

$$\Pi = \frac{L_\Omega^{2,5}}{i_r \cdot A_\Omega \cdot RL \cdot \alpha_\Omega^{1,5}} \quad (3)$$

gdzie:

- L_Ω – długość cieków najwyższego rzędu, km,
- α_Ω – parametr fali kinematycznej, $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1/3}$.

Procedura obliczania GcIUH-Clark była następująca:

- a) określenie hietogramu opadu efektywnego – wykorzystano metodę NRCS-CN,
- b) oszacowanie prędkości przepływu fali wezbraniowej v – wartość ta została oszacowana ze wzoru:

$$v = 0,665 \cdot \alpha_{\Omega}^{0,6} \cdot (i_r \cdot A_{\Omega})^{0,4} \quad (4)$$

c) obliczenie czasu koncentracji ze wzoru:

$$T_c = 0,2778 \cdot \frac{L_{\Omega}}{v} \quad (5)$$

d) obliczenie przepływu w kulminacji ze wzoru (2),

e) określenie wartości współczynnika R w procedurze optymalizacji, polegającej na poszukiwaniu wartości wspomnianego współczynnika, przy obliczonym w punkcie c czasie koncentracji T_c , tak aby uzyskać w efekcie wartość Q_p określoną w punkcie d.

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

W tab. 2 zestawiono wyniki optymalizacji wartości parametrów T_c i R modelu IUH Clark i GcIUH-Clark. Jak wynika z obliczeń przeprowadzonych dla analizowanych fal, parametr T_c w przypadku IUH Clark jest wyraźnie wyższy niż przy modelu GcIUH-Clark. Dla modelu IUH Clark parametr ten wynosi 7,28 h, a dla GcIUH-Clark jest on równy 5,05 h. Natomiast w przypadku współczynnika retencji R niższą wartość, wynoszącą 14,53 h, uzyskano z modelu IUH Clark niż z GcIUH-Clark, w którym R jest równe 16,78 h. Różnice w średnich geometrycznych pomiędzy dwoma modelami wynoszą dla T_c ponad 30%, a dla R ponad 13%.

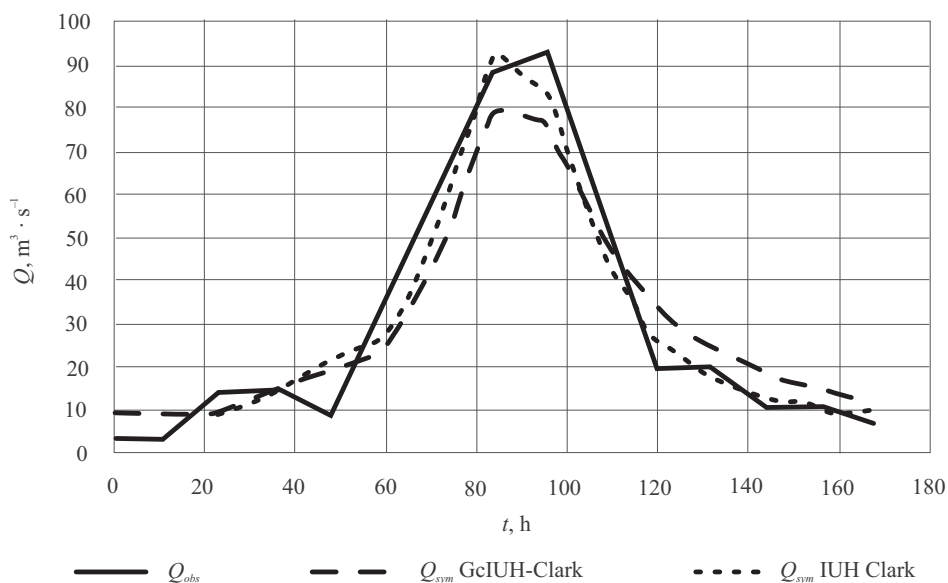
Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń parametrów modelu Clarka

Table 2. Results of calculate of Clark model parameters

Nr wezbrania Number of wave	Model IUH Clark IUH Clark model		Model GcIUH-Clark GcIUH-Clark model	
	T_c , h	R , h	T_c , h	R , h
1	10,0	17,4	6,0	24,0
2	5,3	12,14	4,25	11,73
Średnia – Mean	7,28	14,53	5,05	16,78

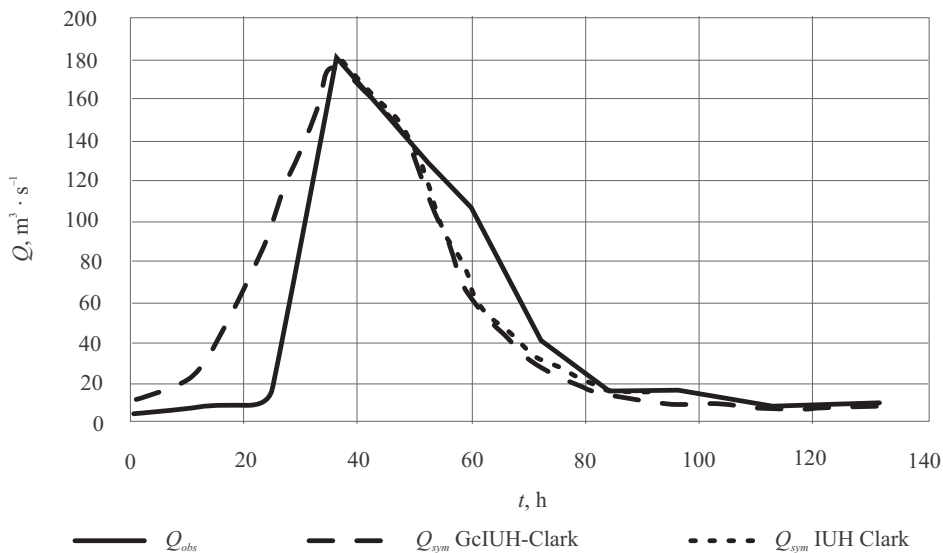
Wartości prędkości fali wezbraniowej określone wg wzoru (4) wyniosły $2,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla epizodu 1 i $2,99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla epizodu 2. Na rys. 2 i 3 przedstawiono przebieg hydrogramów obserwowanych i obliczonych wg omawianych metod dla obu analizowanych epizodów.

Jak wynika z przeprowadzonych symulacji, hydrogramy uzyskane z omawianych metod dość dobrze opisują rzeczywiste wezbrania. Daje się zauważyć nieco lepszą zgodność przepływów w kulminacji, zwłaszcza w przypadku epizodu 2, uzyskaną z modelu IUH Clarka w stosunku do GcIUH-Clark. Wynika to z faktu, że optymalizacja parametrów pierwszego modelu prowadzona była do uzyskania jak najlepszej zgodności hydrogramu obliczonego z rzeczywistym. W przypadku drugiego modelu cel optymalizacji stanowił taki dobór wartości parametrów, który pozwoliłby uzyskać jak najlepszą zgodność Q_p obliczonego ze wzoru (2) z uzyskanym w czasie symulacji. W przypadku epizodu 1



Rys. 2. Porównanie hydrogramów obliczonych wg modelu IUH Clarka i GcIUH-Clark i obserwowanych dla epizodu 1

Fig. 2. Comparison of observed and simulated from IUH Clark and GcIUH-Clark hydrograms for episode 1



Rys. 3. Porównanie hydrogramów obliczonych wg modelu IUH Clarka i GcIUH-Clark i obserwowanych dla epizodu 2

Fig. 3. Comparison of observed and simulated from IUH Clark and GcIUH-Clark hydrograms for episode 2

przeływy w kulminacji hydrogramów obliczonych wyprzedzają o 12 h kulminację na fali obserwowanej, z kolei w epizodzie 2 czasy do kulminacji się pokrywają. W tab. 3 porównano wartości przepływów w kulminacjach dla fal obserwowanych i obliczonych z miarami efektywności modelu. Wykorzystano następujące wskaźniki jakości modeli:

– współczynnik efektywności E Nasha i Sutcliffe [1970]:

$$E = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (Q_{o(\tau)} - Q_{s(\tau)})^2}{\sum_{i=1}^{i=N} (Q_{o(\tau)} - \bar{Q}_o)^2} \right] \quad (6)$$

– procentowy błąd przepływu w kulminacji PEP , %:

$$PEP = \left(1 - \frac{Q_{sym}}{Q_{obl}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

– procentowy błąd czasu do kulminacji $PETP$, %:

$$PETP = \left(1 - \frac{T_{psym}}{T_{pobl}} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

– procentowy błąd objętości fali PEV , %:

$$PEV = \left(1 - \frac{V_{sym}}{V_{obl}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Tabela 3. Zestawienie wielkości przepływów w kulminacji i miar jakości modelu

Table 3. Peak discharges and measures of quality models

Nr wezbrania Number of wave	Q_p obserwowane Q_p observed $m^3 \cdot s^{-1}$	Q_p IUH Clark $m^3 \cdot s^{-1}$	Q_p GcIUH-Clark $m^3 \cdot s^{-1}$	E^*	PEP^*	$PETP^*$	PEV^*
1	92,8	92,825	79,63	$\frac{0,94}{0,90}$	$\frac{-0,03}{14,2}$	$\frac{12,5}{12,5}$	$\frac{-2,95}{-1,81}$
2	178,0	177,99	180,45	$\frac{0,78}{0,77}$	$\frac{0,003}{-1,38}$	$\frac{0,00}{0,00}$	$\frac{7,72}{7,72}$

* – $\frac{\text{IUH Clark}}{\text{GcIUH-Clark}}$

Obliczenia wykazały, że klasyczny model Clarka pozwala na lepszy opis obserwowanych wezbrań w stosunku do modelu GcIUH-Clark, o czym świadczą wartości współczynnika efektywności E i PEP . W przypadku pozostałych dwóch miar jakości wyniki uzyskane dla obu modeli są jednakowe, z tym że gdy chodzi o PEV , model GcIUH-Clark w przypadku epizodu 1 uzyskał nieco lepszą ocenę. Określając przydatność analizowa-

nych metod do opisu wezbrań opadowych w zlewni Stobnicy wg kryteriów podanych przez Moriasiego i in. [2007], należy stwierdzić, że uzyskały one bardzo dobrą ocenę. Wg wspomnianych autorów, jeżeli wartość współczynnika efektywności E przekracza 0,75, można uznać, że badany model bardzo dobrze opisuje rzeczywistość. Podobne wnioski co do poprawności opisu obserwowanych wezbrań przez model IUH Clarka i GcIUH-Clark wynikają z badań prowadzonych przez Adiba i in. [2011] w zlewni Kasilii w Iranie leżącej w zlewisku Morza Kaspijskiego. Jest to zlewnia charakteryzująca się wilgotnym klimatem i mająca charakter górski. Wg wspomnianych autorów wartości współczynnika efektywności E dla modelu GcIUH-Clark wahały się w przedziale od 0,71 do 0,89, a dla IUH Clarka od 0,06 do 0,89. Można więc stwierdzić, że zarówno w przypadku cytowanych, jak i prezentowanych w niniejszej pracy badań uzyskano podobną efektywność analizowanych modeli. W prezentowanych badaniach, mimo że model GcIUH-Clark wykazał nieznacznie niższą efektywność od IUH Clarka, to jednak można go zastosować do symulacji wezbrań w zlewniach, dla których brak pomiarów hydrometrycznych. Wynika to z faktu, że parametry modelu są ustalane na podstawie przepływu w kulminacji, który zależy wyłącznie od charakterystyk geomorfoklimatycznych zlewni, przez co nie wykorzystuje się informacji zawartych w zarejestrowanych epizodach typu opad–odpływ, jak ma to miejsce w przypadku modelu IUH Clarka.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wysunąć następujące wnioski:

1. Modele oparte na chwilowym hydrogramie jednostkowym Clarka poprawnie opisują wezbrania opadowe w zlewni wyżynnej.
2. Spośród analizowanych modeli wyższą efektywnością w opisie rzeczywistego wezbrania charakteryzował się model IUH Clarka, dla którego wartości współczynnika efektywności E wynosiły 0,98 i 0,78. Model GcIUH-Clark uzyskał nieznacznie niższą ocenę – wartości współczynnika E wahały się od 0,77 do 0,9. Największe różnice obserwowano w przypadku wskaźnika PEP , co wynikało z odmiennych zasad prowadzenia optymalizacji parametrów.
3. Wielkości parametrów analizowanych modeli dzieliły różnice. I tak w przypadku czasu koncentracji T_c różnice te wyniosły ponad 30%, a w przypadku współczynnika retencji R ponad 13%, w zależności od zastosowanego hydrogramu.
4. Model GcIUH-Clark może mieć zastosowanie do symulacji wezbrań w zlewniach niekontrolowanych wywołanych opadem rozlewnym. Jego użycie w praktyce powinno jednak zostać zweryfikowane na pełniejszym materiale obserwacyjnym pochodzącym z wielu zlewni o różnej charakterystyce oraz wezbrań wywołanych opadem o różnym czasie trwania.

PIŚMIENNICTWO

Adib A., Salarijazi M., Vaghefi M., Mahmoodian-Shoostari M., Akhondali A.M., 2010. Comparison between GcIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 34, 91–103.

- Adib A., Salarijazi M., Vaghefi M., Mahmoodian-Shooshtari M., Akhondali A.M., 2011. Comparison between characteristics of Geomorphoclimatic Instantaneous Unit hydrograph be produced by GeIUH based Clark model and Clark IUH model. *J Marine Sci. Technol.* 19(2), 201–209.
- Bhunya P.K., Berndtsson R., Ojha C.S.P., Mishra S.K., 2007. Suitability of gamma, Chi-square, Weibull and beta distributions as synthetic unit hydrographs. *J. Hydrol.* 334, 28–38.
- Clark C.O., 1945. Storage and the unit hydrograph. *Trans. ASCE* 110, 1419–1446.
- Cleveland T.G., Thompson D.B., Xing F., Xin H., 2008. Synthesis of Unit Hydrographs from a Digital Elevation Model. *J. Irrig. Drain. Engin.* 134(2), 212–221.
- Gupta V.K., Waymire E., Wang C.T., 1980. A representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.* 16(5), 855–862.
- Kondracki J., 2009. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Naukowe PWN Warszawa.
- Kumar R., Chatterjee C., Lohani A.K., Kumar S., Singh R.D., 2002. Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Water Resour Manag* 16(4), 63–78.
- Kumar A., Kumar D., 2008. Predicting Direct Runoff from Hilly Watershed Using Geomorphology and Stream – Order – Law Ratios: Case Study. *J. Hydrol. Eng.*, 13, 570-576.
- Hydrologic Modelling System HEC-HMS. 2009. User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- Mapa podziału hydrograficznego Polski [MPHP]. 2005. Cz. 2. IMGW Warszawa.
- Moriassi D.N., Arnold J.G., van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASCE* 50(3), 885–900.
- Nash J. E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *J. Hydrol. (Amst.)* 10(3), 282–290.
- Pociask-Karteczka J., 2006. *Zlewnia, właściwości i procesy*. Wyd. UJ Kraków.
- Rodríguez-Iturbe I., Valdés J.B., 1979. The geomorphologic structure of hydrology response. *Water Resour. Res.* 15(6), 1409–1420.
- Rodríguez-Iturbe I., González-Sanabria M., Caamaño G., 1982. On the climatic dependence of the IUH: a rainfall-runoff theory of the Nash model and the geomorphoclimatic theory. *Water Resour. Res.* 18(4), 887–903.
- Sahoo B., Chatterjee C., Raghuvanshi N. S., Singh R., 2006. Flood estimation by GIUH-based Clark and Nash models. *J. Hydrol. Engin. ASCE* 11(6), 515–525.
- Sorman A.U., 1995. Estimation of Peak Discharge Using GIUH Model in Saudi Arabia. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 121, 287–293.
- Wałęga A., Cupak A., Krzanowski S., Paluszkiwicz B., Będkowski M., 2009. Określenie zagrożenia powodziowego w zlewni Wisłoka. Etap III. Przeprowadzenie obliczeń hydrologicznych i hydraulicznych. Obliczenia hydrologiczne. Maszynopis. UR Kraków.
- Yen B.C., Lee, K.T., 1997. Unit Hydrograph Derivation for Ungauged Watersheds by Stream-Order Laws. *J. Hydrol. Eng.* 2, 1–9.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 17.10.2012