

PRACE ORYGINALNE ORIGINAL PAPERS

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2016), 25 (4), 387–396
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2016), 25 (4)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2016), 25 (4), 387–396
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2016), 25 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>

Urszula SOMOROWSKA, Mateusz ŚLĄZEK

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski
Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw

Zastosowanie modelu HBV-light do symulacji odpływu rzeki nizinnej **Application of the HBV-light model for discharge simulation of lowland river**

Słowa kluczowe: symulacja odpływu, model HBV-light, rzeka nizinna

Key words: discharge simulation, HBV-light model, lowland river

Wprowadzenie

W modelowaniu procesów hydrologicznych szerokie zastosowanie znajdują konceptualne modele relacji opad–odpływ, których rozwój trwa od kilkudziesięciu lat (Soczyńska, 1997; Banasik i in., 2000; Orth i in., 2015). W praktyce hydrologicznej są one często stosowane ze względu na stosunkowo prostą strukturę, niewielką liczbę parametrów oraz coraz szybsze i wydajniejsze procedury optymalizacji. Struktura modeli dostosowywana jest do systemu fizycznego, z uwzględnieniem cech fizycznogeograficznych oraz przekształceń antropogenicznych. Na etapie

wyboru struktury modelu konceptualnego następuje zdefiniowanie najważniejszych procedur transformacji opadu w odpływ. Podstawowym problemem, jaki pojawia się w procesie kalibracji i weryfikacji modeli w zlewniach kontrolowanych hydrometrycznie (oprócz doboru właściwej struktury modelu), jest dostępność danych wejścia do modelu o czasowej i przestrzennej rozdzielczości dostosowanej do wielkości zlewni, a także wiarygodność danych natężenia przepływu niezbędnych w procesie weryfikacji.

W pracy przedstawiono wyniki kalibracji i weryfikacji modelu hydrologicznego HBV (szw. Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) w wersji „light” (Seibert, 2005; Seibert i Vis, 2012), który został zastosowany do symulacji odpływu nizinnej rzeki Liwiec. Uszczegółowieniem wcześniejszych prac, w których wejściem do modelu były

punktowe dane meteorologiczne rejestrowane na stacji meteorologicznej w Siedlcach (Somorowska i Piętka, 2012; Jankowska, 2015), jest wykorzystanie gridowych danych opadu i temperatury powietrza pochodzących z bazy danych naziemnych E-OBS (Haylock i in., 2008). W meteorologii termin danych gridowych utożsamiany jest z wartością elementów meteorologicznych występujących w punktach węzłowych regularnej siatki przestrzennej o określonej rozdzielczości (Ustrnul, 2001). Informacja w siatce przestrzennej jest tworzona na podstawie informacji rozproszonej (punktowej) z wykorzystaniem procedur interpolacji. Jednocześnie punkty węzłowe siatki są środkami komórek (pikseli) pokrywających płaszczyznę. W pracy dokonano oceny poprawności działania modelu hydrologicznego na podstawie różnych wskaźników dopasowania odpływu symulowanego do obserwowanego. Nowością jest również zastosowanie danych ewapotranspiracji, pozyskanych z projektu MODIS (Mu i in., 2011), w procesie weryfikacji modelu.

Material i metody

Obszar badań

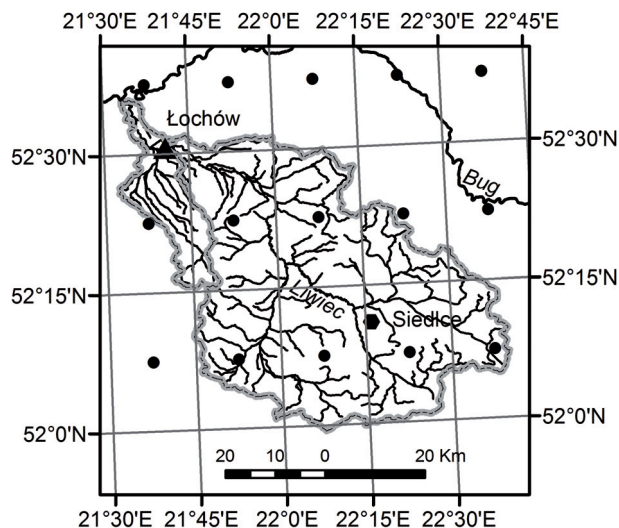
Analizą objęto nizinną zlewnię Liwca w granicach 2470 km², po profil wodowskazowy w Łochowie. Deniwelacje terenu sięgają w zlewni ponad 130 m (Jankowska, 2015). Utwory powierzchniowe zbudowane są przeważnie z piasku o różnej granulacji, a tylko kilkanaście procent powierzchni zlewni to obszary pokryte pyłem, gliną lub torfami. Wysokość opadu średniego rocznego zmierzzonego w latach 2000–2014 wyniosła

530 mm, przy czym największe sumy opadów miesięcznych występują w miesiącach letnich, w czerwcu, lipcu i sierpniu. Rzekę cechuje ustrój hydrologiczny śnieżny silnie wykształcony, z wezbraniem roztopowym na przełomie marca i kwietnia, spowodowanym tajaniem pokrywy śnieżnej, czemu często towarzyszą opady deszczu powodujące zwiększenie wysokości wezbrania. W latach hydrologicznych 2000–2014 największy przepływ wystąpił w kwietniu 2013 roku (154 m³·s⁻¹, natomiast najmniejszy – w lipcu 2006 roku (1,31 m³·s⁻¹).

Dane meteorologiczne i hydrologiczne

Wykorzystano dobowe sumy opadu oraz średnią dobową temperaturę powietrza, które pozyskano z bazy danych naziemnych E-OBS (Haylock i in., 2008), z 15 punktów gridowych w rozdzielczości przestrzennej 0,25 stopnia szerokości i długości geograficznej (rys. 1). Są to dane udostępniane przez portal projektu European Climate Assessment & Dataset (ECA i Dataset, 2016). Średnie wartości w zlewni obliczono metodą wieloboków równego zadeszczenia (metodą Thiessena). Ponadto wykorzystano dobowe wartości przepływu Liwca w profilu Łochów w latach 2000–2014, udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW).

Na tej podstawie przygotowano podstawowy zbiór w postaci szeregu czasowego obejmującego trzy zmienne: opad, temperaturę powietrza oraz natężenie przepływu. W procesie weryfikacji modelu wykorzystano wartości ośmiiodniowych sum ewapotranspiracji, pozyskanych z projektu MODIS, w postaci produktu o nazwie MOD16A2, wcześniej analizowanych przez Ślązka



RYSUNEK 1. Zlewnia Liwca oraz punkty gridowe bazy danych E-OBS ECA
 FIGURE 1. The Liwiec catchment and grid points of the E-OBS ECA database

(2014). Zostały one obliczone w oparciu o równanie Penmana–Monteitha (Mu i in., 2011). Przestrzennie rozłożone wartości ewapotranspiracji w siatce jednokilometrowej posłużyły do obliczenia wartości średnich w zlewni, a następnie zostały porównane z wartościami ewapotranspiracji obliczonymi w modelu HBV.

Model HBV-light

Model HBV jest modelem konceptualnym typu opad–odpływ, generującym ciągły hydrogram odpływu (Seibert, 2005; Seibert i Vis, 2012). Do opisu procesów hydrologicznych stosowane są równania matematyczne oraz zależności empiryczne, a parametry modelu zidentyfikowane są jedną z dwóch możliwych metod optymalizacji, metodą Monte Carlo lub metodą algorytmu genetycznego z optymalizacją Powella (Seibert, 2000). Model obejmuje podsystem strefy aeracji, a także górny i dolny zbiornik wody

podziemnej. Zbiornik strefy aeracji jest zasilany opadem deszczu lub wodą roztopową. Ubytki wody w tym zbiorniku powstają wskutek parowania, a także w wyniku zasilania zbiornika wody podziemnej, wtedy gdy zostanie przekroczona jego pojemność. Na podstawie aktualnego stanu napełnienia zbiorników wody podziemnej generowany jest odpływ. Model składa się z trzech podstawowych modułów obliczeniowych: modułu pokrywy śnieżnej (ang. snow routine), modułu strefy aeracji (ang. soil routine) oraz modułu generowania odpływu ze zlewni (ang. response routine). W niniejszej pracy zastosowano jedną z kilku możliwych opcji modelu, uwzględniającą generowanie odpływu z opóźnieniem (ang. response routine with delay). Odpowiedzią zlewni steruje kilkanaście parametrów modelu (tab. 1), wyznaczanych w procesie optymalizacji. Poszukiwane są zbiory parametrów, które gwarantują zgodność hydrogramu

TABELA 1. Parametry modelu HBV-light wraz z zakresem wartości deklarowanych w kalibracji
 TABLE 1. Parameters of the HBV-light model and its range declared in the calibration

Parametr Parameter	Opis Description	Jednostki Units	Zakres Range
Moduł pokrywy śnieżnej/Snow routine			
<i>TT</i>	progowa temperatura powietrza, poniżej której opad występuje w postaci śniegu threshold temperature	°C	-1,5–2,5
<i>CFMAX</i>	współczynnik określający wielkość topnienia pod wpływem wzrostu temperatury powietrza o 1°C degree-day factor	mm·°C ⁻¹ ·doba ⁻¹ mm·°C ⁻¹ ·day ⁻¹	1–10
<i>SFCF</i>	współczynnik korekcyjny opadu śniegu snowfall correction factor	–	0,4–1,0
<i>CFR</i>	współczynnik zamarzania refreezing coefficient	–	0,0–0,1
<i>CWH</i>	współczynnik zatrzymania wody z topnienia w pokrywie śnieżnej water holding capacity	–	0,0–0,2
Moduł strefy aeracji/Soil routine			
<i>FC</i>	polowa pojemność wodna field capacity	mm	50–500
<i>LP</i>	progowa część pojemności polowej, poniżej której następuje redukcja ewapotranspiracji threshold for reduction of evaporation	–	0,3–1,0
<i>BETA</i>	współczynnik zasilania strefy saturacji shape coefficient	–	1–6
Moduł generowania odpływu/Response routine			
<i>PART</i>	część zapasu wody przenikającej ze strefy aeracji, która zasila górny zbiornik wody podziemnej portion of the recharge which is added to the upper groundwater reservoir	–	0–1
<i>DELAY</i>	ilość dni, w ciągu których pozostała część zapasu wody przenikającej ze strefy aeracji zasila dolny zbiornik wody podziemnej period of delay days during which the remaining recharge is supplied to the lower groundwater reservoir	doba day	1–200
<i>K1</i>	współczynnik recesji górnego zbiornika wody podziemnej recession coefficient of the upper groundwater reservoir	doba ⁻¹ day ⁻¹	0,01–0,4
<i>K2</i>	współczynnik recesji dolnego zbiornika wody podziemnej recession coefficient of the lower groundwater reservoir	doba ⁻¹ day ⁻¹	0,001–0,15
<i>ALPHA</i>	parametr sterujący wielkością odpływu z górnego zbiornika wody podziemnej parameter shaping the outflow from the upper groundwater reservoir	–	0–1
<i>MAXBAS</i>	parametr funkcji wagowej transformującej odpływ parameter of the triangular weighting function used in runoff transformation	doba day	1–7

symulowanego z hydrogramem obserwowanym, co jest oceniane na podstawie miar efektywności (zgodności) powszechnie stosowanych w hydrologii.

W niniejszej pracy zastosowano procedurę optymalizacji parametrów modelu metodą algorytmu genetycznego oraz optymalizacji Powella (Seibert, 2000), dostępną jako jeden z modułów modelu HBV-light.

Miary zgodności odpływu symulowanego z odpływem obserwowanym

Oceny zgodności działania modelu dokonano na podstawie kilku miar: współczynnika efektywności modelu Nasha–Sutcliffe’a (R_{eff}), logarytmicznego współczynnika efektywności modelu ($R_{eff \ln}$), współczynnika determinacji (R^2) oraz średniej rocznej różnicy między odpływem obserwowanym i odpływem symulowanym (M):

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$R_{eff \ln} = 1 - \frac{\sum (\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum (\ln Q_{obs} - \ln \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{[\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}) \sum (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (3)$$

$$M = \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})}{n} \quad (4)$$

gdzie:

Q_{sim} – odpływ symulowany [$\text{mm} \cdot \text{doba}^{-1}$],
 Q_{obs} – odpływ obserwowany [$\text{mm} \cdot \text{doba}^{-1}$],

\bar{Q}_{sim} – średni odpływ symulowany [$\text{mm} \cdot \text{doba}^{-1}$],

\bar{Q}_{obs} – średni odpływ obserwowany [$\text{mm} \cdot \text{doba}^{-1}$],

n – liczba lat okresu obliczeniowego [-].

Okres kalibracji modelu objął siedem lat hydrologicznych, od 1 listopada 2007 roku do 31 października 2014 roku, uwzględniając ponadto „okres rozgrzewki” (ang. warming up period), rozpoczynający się od 1 listopada 2006 roku, który poprzedził obliczenia. Liczbę uruchomień modelu (ang. model runs) przyjęto jako 5000, liczbę optymalizacji Powella (ang. runs for local optimization) jako 1000, a liczbę kalibracji jako 100. Weryfikacji modelu dokonano na podstawie lat hydrologicznych 2000–2006. W sytuacji idealnego dopasowania wartości symulowanych do obserwowanych pierwsze trzy miary zgodności, określone równaniami (1)–(3), przyjmują wartość 1, natomiast miara M – wartość 0. Efektywność działania modelu oceniono na podstawie kryteriów podanych w literaturze (Sarma i in. 1973; Krause i in., 2005). Według Sarma i innych (1973), jeśli współczynnik determinacji (R^2) mieści się w zakresie (0,91–1,00], model można uznać za znakomity, w zakresie (0,64–0,91] – za bardzo dobry, w zakresie (0,49–0,64] – za dobry, a w zakresie (0,49–0,64] – za zadowalający.

Wyniki i dyskusja

Zbiory optymalnych parametrów modelu, przy których w wyniku kalibracji uzyskano najlepszą zgodność odpływu symulowanego z obserwowanym, przedstawiono w tabeli 2. W poszczególnych

TABELA 2. Parametry modelu HBV-light uzyskane w procesie kalibracji, dające najlepszą efektywność modelu

TABLE 2. Parameters of the HBV-light model retrieved in the calibration giving the best model efficiency

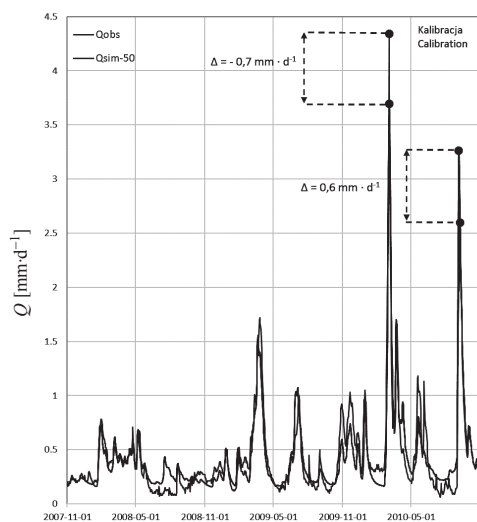
Parametr Parameter	Numer kalibracji/Number of calibration						
	39	43	50	59	60	75	77
<i>TT</i>	0,097	0,187	0,135	0,194	0,178	0,197	0,168
<i>CFMAX</i>	3,808	3,965	3,880	3,956	3,856	4,000	3,910
<i>SFCF</i>	1,400	1,357	1,391	1,363	1,351	1,374	1,378
<i>CFR</i>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<i>CWH</i>	0,100	0,076	0,090	0,084	0,100	0,076	0,100
<i>FC</i>	213	218	220	215	212	206	202
<i>LP</i>	0,955	0,968	0,999	0,998	0,977	0,903	0,887
<i>BETA</i>	3,674	3,704	3,919	3,955	3,846	3,323	3,256
<i>ALPHA</i>	0,103	0,155	0,271	0,246	0,095	0,190	0,160
<i>K1</i>	0,107	0,090	0,064	0,070	0,107	0,078	0,090
<i>K2</i>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
<i>MAXBAS</i>	6,688	6,567	6,846	6,653	6,409	6,480	6,705
<i>PART</i>	0,589	0,609	0,585	0,571	0,588	0,607	0,592
<i>DELAY</i>	200	200	200	200	200	200	200

zbiorach (kalibracje nr 39, 43, 50, 59, 60, 75, 77) wartości parametrów modułu pokrywy śnieżnej (*TT*, *CFMAX*, *SFCF*, *CFR*, *CWR*), a także modułu strefy aeracji (*FC*, *LP*, *BETA*) są zbliżone. Większe różnice występują w przypadku parametru *ALPHA*, sterującego odpływem z górnego zbiornika wody podziemnej. W przypadku wszystkich siedmiu zbiorów parametrów współczynnik efektywności modelu (R_{eff}) wyniósł 0,85, współczynnik determinacji (R^2) – 0,85, logarytmiczny współczynnik efektywności ($R_{eff \ln}$) uzyskał wartość w zakresie 0,72–0,74, a średnia wartość wskaźnika M wyniosła 2 mm (tab. 3). Na tej podstawie można stwierdzić, że w każdej z siedmiu kalibracji uzyskano wyniki odpowiadające bardzo dobrej zgodności, według kryteriów podanych przez

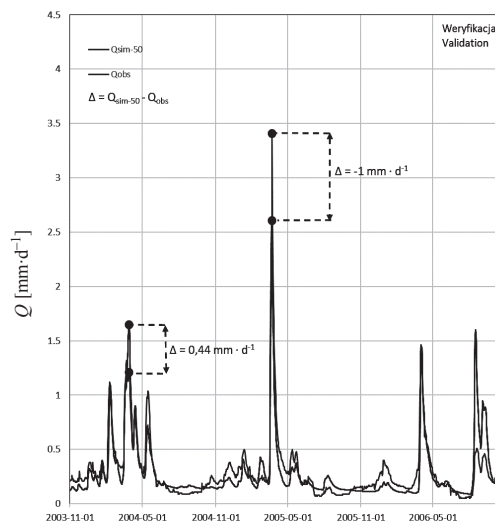
Sarma i innych (1973). Najlepszą zgodność średniego rocznego odpływu symulowanego z odpływem obserwowanym uzyskano ze zbiorem parametrów modelu wyznaczonych w kalibracji nr 50 ($M = 0$, tab. 3). Na tej podstawie przyjęto, że są to optymalne parametry modelu, które wykorzystano w procesie weryfikacji modelu. Wyniki weryfikacji wskazują również na stosunkowo dużą efektywność modelu (tab. 3). Przykładowe hydrogramy odpływu, obserwowane i symulowane, dla okresu kalibracji i weryfikacji przedstawiono kolejno na rysunkach 2 i 3. Należy nadmienić, że pomimo miar zgodności wskazujących na poprawne działanie modelu, zarówno na etapie kalibracji, jak i weryfikacji występują różnice między odpływem obserwowanym i symulowanym, zaznaczające

TABELA 3. Miary zgodności modelu HBV-light dla wybranych zbiorów parametrów modelu
 TABLE 3. Goodness of fit of the HBV-light model for selected parameters sets

Miara zgodności Efficiency measure	Numer kalibracji/Number of calibration						
	39	43	50	59	60	75	77
Kalibracja modelu/Calibration of the model							
R_{eff}	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$R_{eff\ln}$	0,73	0,74	0,72	0,72	0,74	0,73	0,73
R^2	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
M	2	3	0	2	4	2	3
Weryfikacja modelu/Validation of the model							
R_{eff}	0,74	0,74	0,75	0,75	0,74	0,73	0,72
$R_{eff\ln}$	0,72	0,72	0,73	0,73	0,72	0,73	0,72
R^2	0,76	0,75	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73
M	11	12	11	11	12	10	10



RYSUNEK 2. Przebieg odpływu obserwowanego (Q_{obs}) i symulowanego (Q_{sim-50}) w okresie kalibracji modelu w latach 2007–2010. Oznaczenia: $\Delta = Q_{sim-50} - Q_{obs}$
 FIGURE 2. Observed (Q_{obs}) and simulated (Q_{sim-50}) discharge during the calibration period in years 2007–2010. Explanation: $\Delta = Q_{sim-50} - Q_{obs}$



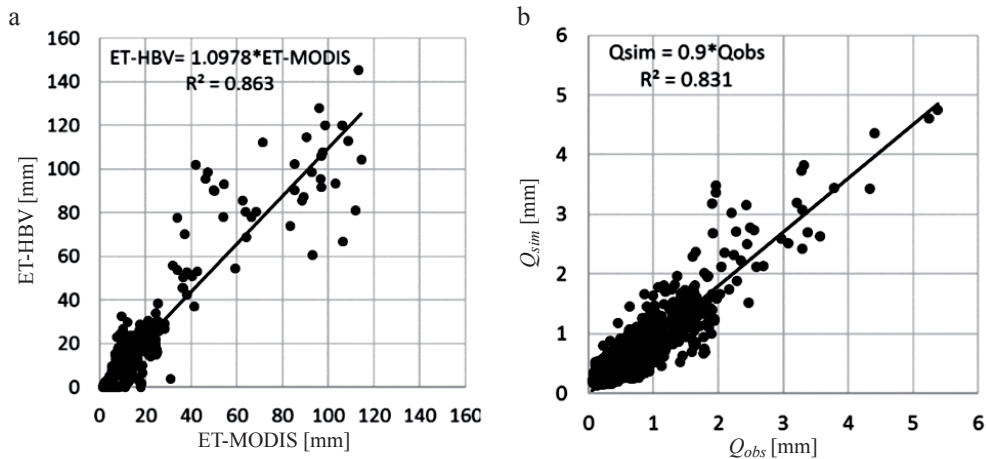
RYSUNEK 3. Przebieg odpływu obserwowanego (Q_{obs}) i symulowanego (Q_{sim-50}) w okresie weryfikacji modelu w latach 2007–2010. Oznaczenia: $\Delta = Q_{sim-50} - Q_{obs}$
 FIGURE 3. Observed (Q_{obs}) and simulated (Q_{sim-50}) discharge during the validation period in years 2007–2010. Explanation: $\Delta = Q_{sim-50} - Q_{obs}$

się zarówno w przypadku odpływów wysokich, jak i niskich. Kulminacja, która wystąpiła w marcu 2010 roku była

przez model zaniżona, a kulminacja, która pojawiła się we wrześniu 2010 roku, po wystąpieniu wyjątkowo dużych

opadów na przełomie sierpnia i września była znacznie zawyżona (rys. 2). Może to być wynik niedokładnego oszacowania opadu obszarowego. Podobnie z tej samej przyczyny mogą wynikać różnice, które zaznaczają się w okresie, który przyjęto do weryfikacji modelu (rys. 3). Średnio odpływy symulowane (Q_{sim}) są nieznacznie mniejsze niż odpływy obserwowane (Q_{obs}) – rysunek 4b. Symulowane wartości ewapotranspiracji (ET-HBV) są średnio nieco większe od wartości według danych ET-MODIS (rys. 4a). Możliwość niedoszacowania wartości ewapotranspiracji w skali zlewni według danych MODIS była wcześniej sygnalizowana przez innych autorów (Ruhoff i in., 2013).

14 parametrów modelu została przeprowadzona z wykorzystaniem metody algorytmu genetycznego i optymalizacji Powella (Seibert, 2000). Wysokie wskaźniki efektywności modelu HBV-light, uzyskane zarówno w procesie kalibracji, jak i weryfikacji, wskazują na możliwość stosowania modelu w przypadku dużej zlewni nizinnej, o małej antropopresji. Model został skalibrowany i zweryfikowany na podstawie porównania odpływu symulowanego z obserwowanym, jak również na podstawie porównania ewapotranspiracji symulowanej w modelu z wartościami według danych MODIS. Pomimo uzyskania miar zgodności wskazujących na dużą efektywność modelu, zaznaczają się istotne różnice



RYSUNEK 4. Porównanie ośmiodniowych sum ewapotranspiracji obliczonej w modelu HBV-light (ET-HBV) oraz ewapotranspiracji według danych MODIS (ET-MODIS) (a), oraz porównanie dobowego odpływu obserwowanego (Q_{obs}) oraz odpływu symulowanego w modelu HBV-light (Q_{sim-50}) (b)
 FIGURE 4. Comparison of the eight-day sum of evapotranspiration calculated in the HBV-light model (ET-HBV) and evapotranspiration according to the MODIS data (ET-MODIS) (a), and comparison of daily observed discharge (Q_{obs}) and daily discharge simulated by the HBV-light model (Q_{sim-50}) (b)

Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki kalibracji i weryfikacji modelu HBV w wersji „light” w zlewni Liwca. Optymalizacja

w symulowanych wartościach odpływu. Dotyczy to zarówno odpływu wezbraniowego, jak i niżówkowego. Różnice nie mają charakteru systematycznego;

w niektórych terminach występuje niedoszacowanie, w innych zaś – przeszacowanie. O ile dokładność modelowania odpływu wezbraniowego bardzo istotnie zależy od oceny opadu obszarowego, to w przypadku przepływów niskich niezwykle ważne jest prawidłowe ustalenie parametrów modelu sterujących odpływem podziemnym. Problem kalibracji modelu w zakresie wartości ekstremalnych może również wynikać z niedokładności krzywych natężenia przepływu, na podstawie których wyznaczany jest przepływ według danych IMGW (Ozga-Zieliński i in., 2014). Dalsze prace w celu poprawy wyników kalibracji mogą być podjęte z zastosowaniem syntetycznych ciągów danych meteorologicznych, z zachowaniem rozkładów prawdopodobieństwa zgodnych z danymi klimatycznymi. Próbę poprawy symulacji odpływu niskiego można podjąć z wykorzystaniem niezależnie wyznaczonych krzywych recesji odpływu.

Literatura

- Banasik, K., Górski, D. i Ignar, S. (2000). *Modelowanie wezbrań opadowych i jakość odpływu z małych nieobserwowanych zlewni rolniczych*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- ECA i Dataset (2016). *European Climate Assessment & Dataset*. Retrieved from Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): <http://eca.knmi.nl/>.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. i New, M.R. (2008). A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, 1-2. D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- Jankowska, I. (2015). *Sezonowa i wieloletnia zmienność zasobów wodnych strefy aeracji w zlewni nizinnej. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*. Warszawa: Komitet Gospodarki Wodnej PAN.
- Krause, P., Boyle, D.P. i Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97. doi:10.5194/adgeo-5-89-2005.
- Mu, Q., Zhao, M. i Running, S.W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115 (8), 1781-1800. doi:10.1016/j.rse.2011.02.019.
- Orth, R., Staudinger, M., Seneviratne, S.I., Seibert, J. i Zappa, M. (2015). Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *Journal of Hydrology*, 523, 147-159. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.044.
- Ozga-Zieliński, B., Szkutnicki, J. i Chudy, Ł. (2014). Krzywa natężenia przepływu a przepływy ekstremalne. *Przegląd Geofizyczny*, 59 (3-4), 85-110.
- Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Aragao, L.E.O.C., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., ... Running, S.W. (2013). Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (8), 1658-1676. doi:10.1080/02626667.2013.837578.
- Sarma, P.B.S., Delleur, J.W. i Rao, A.R. (1973). Comparison of rainfall-runoff models for urban areas. *Journal of Hydrology*, 18, 329-347. doi:10.1016/0022-1694(73)90056-5.
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 215-224. doi:10.5194/hess-4-215-2000.
- Seibert, J. (2005). *HBV-light version 2.0, User's Manual*. Pobrano z lokalizacji University of Zurich, Department of Geography: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/h2k/docs/download/hbv_manual_2005.pdf.
- Seibert, J. i Vis, M. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology*

- and *Earth System Sciences*, 16, 3315-3325. doi:10.5194/hess-16-3315-2012.
- Soczyńska, U. (1997). Rozwój badań nad zastosowaniem modeli konceptualnych. W U. Soczyńska (red.), *Hydrologia dynamiczna* (strony 364-381). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Somorowska, U. i Piętka, I. (2012). Streamflow changes in mesoscale lowland catchment under future climate conditions. *Papers on Global Change IGBP*, 19, 53-65.
- Ślązek, M. (2014). Czasowa zmienność i przestrzenne zróżnicowanie procesu ewapotranspiracji zlewni nizinnej w kontekście kondycji szaty roślinnej. W A. Magnuszewski (red.), *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej: II Krajowy Kongres Hydrologiczny. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, XX*. 91-101. Warszawa: Komitet Gospodarki Wodnej PAN.
- Ustrnul, Z. (2001). Dane gridowe a cyrkulacja atmosferyczna. *Rocznik Fizycznogeograficzny*, 6, 7-12.

Streszczenie

Zastosowanie modelu HBV-light do symulacji odpływu rzeki nizinnej. W pracy zaprezentowano wyniki kalibracji i weryfikacji modelu HBV w wersji „light” na przykładzie nizinnej rzeki Liwiec. W wyniku optymalizacji 14 parametrów modelu metodą algorytmu genetycznego wyznaczono zbiory danych, przy których uzyskano największą

zgodność odpływu symulowanego z obserwowanym. Nowością jest wykorzystanie w procesie weryfikacji modelu danych ewapotranspiracji, pozyskanych z projektu MODIS. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość wykorzystania modelu w symulacji odpływu dużej zlewni nizinnej.

Summary

Application of the HBV-light model for discharge simulation of lowland river.

In this paper results of the calibration and verification of the HBV-light model are presented on the example of the lowland Liwiec river. According to the optimization procedure of 14 model parameters by use of the genetic algorithm, the parameter sets were determined with which the best model efficiency was obtained. Novelty lies in the application of the MODIS evapotranspiration data in the verification of the model. Results indicates that the HBV-light model might be applied in discharge simulation of mesoscale lowland catchment.

Authors' address:

Urszula Somorowska, Mateusz Ślązek (doktorant)
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
00-927 Warszawa, ul. Krakowskie Przedmieście 30
Poland
e-mail: usomorow@uw.edu.pl