

Wpływ jakości danych przestrzennych na wyniki modelowania obiegu wody w dorzeczu Parsęty*

Influence of spatial data quality on modelling of water circulation
in the Parsęta drainage basin

Joanna Gudowicz

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

Słowa kluczowe: dane przestrzenne, modelowanie hydrologiczne, obieg wody, SWAT
Keywords: spatial data, hydrological modelling, water circulation, SWAT

Wstęp

Numeryczne modele hydrologiczne zaczęły powstawać w latach 60. ubiegłego wieku. (Rockwood, 1964; Dawdy, O'Donnell, 1965; Crawford, Linsley, 1966; Sugawara, 1967). Na przestrzeni kolejnych dekad opracowana została bardzo duża liczba integralnych modeli obiegu wody, które holistycznie obejmują większość zachodzących w zlewni procesów (Beven, 2001). Charakter, zasięg i funkcjonowanie obiegu wody zależą od właściwości środowiska przyrodniczego zlewni, a w tym przede wszystkim rzeźby terenu, litologii utworów powierzchniowych, przebiegu i natężenia opadów atmosferycznych, struktury pokrycia terenu i użytkowania ziemi oraz działalności człowieka (Kostrzewski, 2003). W ujęciach modelowych bardzo istotne jest zatem uwzględnienie przestrzennej zmienności wymienionych charakterystyk środowiska. Realizacja tego założenia jest szczególnie efektywna w oparciu o systemy informacji geograficznej oraz metody nauki o informacji geograficznej (ang. *geographical information science, GISc*), tj. geoinformacji. Istotnym problemem badawczym jest ocena wpływu jakości cyfrowych danych przestrzennych na wyniki analiz (Hejmanowska, 2006), w tym na wyniki symulacji bilansu wodnego i transportu osadów w skali zlewni (Gassman i in., 2014). W procesie każdego modelowania dąży się do uzyskania równowagi pomiędzy kompletnością i szczegółowością modelu a jego użytecznością. Wielowymiarowe modele hydrologiczne mogą obejmować bardzo dużą liczbę parametrów sterujących i kon-

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy nr N N306 0409 36.

trolujących zachowania wody (Zwoliński, 2010). Dzięki systemom informacji geograficznej możliwa jest łatwa iteracyjność procesu generowania i zmiany tych parametrów na wejściu do modelu. Analizy geoinformacyjne umożliwiają więc szczegółową analizę wpływu poszczególnych parametrów na ostateczne wyniki modelowania i wybór najbardziej optymalnej struktury modelu dla analizowanych warunków fizyczno-geograficznych zlewni.

Dobrze skonstruowany i zweryfikowany numeryczny model obiegu wody może umożliwić badanie różnych scenariuszy rozwoju geoekosystemu zlewni. Jest to szczególnie istotne, gdyż w ostatnich latach w wyniku licznych przejawów globalnych zmian klimatu zaobserwować można zintensyfikowane, ekstremalnie wzmożone oddziaływanie wody na funkcjonowanie geoekosystemów, a jednocześnie na codzienne życie i gospodarkę człowieka (Kundzewicz i in., 2008; Zwoliński, 2011). Opracowane prognozy rozwoju geoekosystemu zlewni jako wynik modelowania mogą być pomocne w prowadzeniu efektywnej i zrównoważonej gospodarki przez wypracowanie alternatywnych metod zarządzania obszarami zlewni dla poszczególnych scenariuszy klimatycznych.

Celem przeprowadzonych badań była ocena w jakim stopniu wyniki symulacji obiegu wody wykonane za pomocą modelu hydrologicznego są zależne od jakości wejściowych danych przestrzennych. Badaniem objęto dorzecze Parsęty. Modelowanie oparte było o zastosowanie modelu SWAT (ang. *Soil and Water Assessment Tool*) (Arnold i in., 1998) zintegrowanego za pomocą aplikacji ArcSWAT z oprogramowaniem ArcGIS.

Obszar badań

Modele hydrologiczne wymagają uwzględnienia specyfiki cech środowiska fizyczno-geograficznego danej zlewni i dostosowania tych modeli do warunków analizowanego regionu. Modelowanie obiegu wody przeprowadzono na obszarze młodogłacjalnym w obrębie dorzecza Parsęty. Dorzecze to obejmuje prawie cały obszar Pomorza Środkowego, należy bezpośrednio do zlewiska Morza Bałtyckiego i jest największym wśród zlewni rzek Przymorza (Zwoliński, 1989).

Badaniem objęto zlewnię Parsęty do profilu zamykającego w Bardach, 25,0 km od ujścia rzeki do Morza Bałtyckiego (rys. 1). Powierzchnia obszaru badań wynosi 2866 km², co stanowi 93,4% powierzchni całego dorzecza. Reprezentatywność zlewni dla obszarów młodogłacjalnych umiarkowanej strefy klimatycznej określa jej położenie w zasięgu form pogłacjalnych, mozaikowy układ litologii utworów powierzchniowych, struktury gleb, pokrycia terenu i użytkowania ziemi, wyrównany reżim przepływów wody, duży stopień bezodpływowości, retencyjności i bezwładności hydrologicznej (Zwoliński, 1989; Kostrzewski i in., 1994; Kostrzewski, 1998).

Metodyka i materiały

Zastosowany w badaniach model SWAT (Arnold i in., 1998) zaklasyfikować można jako model oparty na podstawach fizycznych, deterministyczny, operujący w skali zlewni rzecznej dla dobowego kroku obliczeń, czyli model czasu ciągłego. Jego efektywność obliczeniowa umożliwia wykonywanie symulacji dla bardzo dużych obszarów oraz długich odcinków czasu. Ze względu na możliwości odzwierciedlenia charakterystyk przestrzennych zlewni,

SWAT zaliczyć można do modeli o parametrach quasi-przestrzennie rozłożonych. Zlewnia rzeczna jest dzielona na wiele zlewni cząstkowych (subzlewni), które składają się z jednostek reakcji hydrologicznej lub inaczej jednorodnych obszarów hydrologicznych (ang. *hydrologic response units*, HRU). Jednostki te są homogeniczne ze względu na pokrycie terenu i użytkowanie ziemi, charakterystyki glebowe oraz spadki terenu.

Do podstawowych danych wejściowych do modelu SWAT należy zaliczyć cyfrowy model wysokościowy, mapę pokrycia terenu i użytkowania ziemi, mapę glebową oraz dane meteorologiczne. Do podstawowych zmiennych wyjściowych należy odpływ wody, odpływ osadów i odpływ jonowy, a także ewapotranspiracja dla powierzchni całej zlewni, poszczególnych zlewni cząstkowych i jednostek reakcji hydrologicznej. W badaniach wykorzystana została wersja modelu SWAT2009 (Neitsch i in., 2011). Z zaimplementowanych w modelu metod zastosowano między innymi metodę szacowania opadu efektywnego SCS-CN (ang. *Soil Conservation Service Curve Number*) (USDA-SCS, 1972), metodę szacowania ewapotranspiracji Penmana-Monteitha (Monteith, 1965), zmodyfikowane uniwersalne równanie strat glebowych (ang. *Modified Universal Soil Loss Equation*, MUSLE) (Williams, 1975).

Do przeprowadzenia symulacji bilansu wodnego dla zlewni Parsęty pozyskano zestawy danych wejściowych, które charakteryzowały się różną dokładnością przestrzenną i tematyczną. Podstawowym zestawem danych był cyfrowy model wysokościowy. Wykorzystano trzy źródła danych:

- DEM utworzony na podstawie interpolacji wartości poziomic pochodzących z wektoryzacji map topograficznych w skali 1:10 000 (rozdzielczość 10 m);
- DEM pozyskany z danych DTED2 (rozdzielczość 30 m);
- DEM pozyskany z danych SRTM w wersji czwartej (rozdzielczość 90 m) (Jarvis i in., 2008).

Wykorzystano również trzy źródła map glebowych:

- mapy glebowo-rolnicze Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach pozyskane z bazy Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Szczecinie (skala 1:25 000), które uzupełniono w oparciu o mapy geologiczne (skala 1:50 000) pozyskane z Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego;
- dane pozyskane z bazy gleb Harmonized World Soil Database (HWSD) (skala 1:1 000 000) (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012);
- dane pozyskane z bazy FAO-UNESCO Digital Soil Map of the World (FAO-UNESCO) (skala 1:5 000 000) (FAO-UNESCO, 2003).

Dla wydzielen na mapach dla poszczególnych poziomów glebowych określono wymagane parametry fizyczne takie jak: grupa hydrologiczna gleby, maksymalna głębokość uкорzenia, głębokość profilu glebowego, gęstość objętościowa, współczynnik filtracji w stanie pełnego nasycenia, zawartość węgla organicznego, zawartość ilu, zawartość pyłów, zawartość piasków, zawartość części szkieletowych, współczynnik erozyjności gleby. Właściwości fizyczne określone były na podstawie parametrów dostępnych w powyższych bazach danych glebowych oraz na podstawie literatury (Ignar, 1988; Renard i in., 1997).

W badaniach wykorzystano mapy pokrycia terenu i użytkowania ziemi z czterech horyzontów czasowych. Źródłem danych była baza CORINE Land Cover (rok 1990, 2000, 2006) oraz dane opracowane na podstawie wektoryzacji mapy topograficznej w skali 1:100 000 (rok 1975). Aby przygotowane mapy pokrycia terenu i użytkowania ziemi mogły być wyko-

rzystane w modelu SWAT wymagały one reklasyfikacji do klas, które zawarte są w bazie danych parametrów modelu.

W symulacjach zastosowano dane meteorologiczne pozyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej z wielolecia 1966-2010. Dane pochodziły z 4 stacji meteorologicznych (Koszalin, Kołobrzeg, Resko, Szczecinek) oraz 10 posterunków opadowych znajdujących się w obrębie i w najbliższym sąsiedztwie dorzecza Parsęty.

Przygotowane zestawy danych wejściowych posłużyły do utworzenia różnych wersji modelu SWAT, które charakteryzowały się odmiennymi danymi wysokościowymi oraz glebowymi (tab. 1). Wejściowe dane pokrycia terenu i użytkowania ziemi oraz dane meteorologiczne były w trzech wersjach jednolite. Opracowanie różnych struktur modelu SWAT umożliwiło przeanalizowanie wpływu jakości wejściowych danych wysokościowych oraz glebowych na wyniki modelowanego bilansu wodnego. Weryfikacja wyników oparta była o zastosowanie współczynników statystycznych: determinacji R^2 , efektywności modelu Nasha-Sutcliffe'a (NSE) oraz współczynnika odchylenia procentowego (PBIAS). Trzy wybrane współczynniki należą do najczęściej opisywanych w literaturze dotyczącej modelowania z wyko-

Tabela 1. Dane przestrzenne projektów SWAT dla obszaru zlewni Parsęty

Dane przestrzenne	Projekt SWAT_1	Projekt SWAT_2	Projekt SWAT_3
Ukształtowanie rzeźby terenu	DEM na podst. wektoryzacji (1:10 000)	DEM DTED2	DEM SRTM
Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi	mapa na podst. wektoryzacji, baza CLC (1:100 000)	mapa na podst. wektoryzacji, baza CLC (1:100 000)	mapa na podst. wektoryzacji, baza CLC (1:100 000)
Gleby	baza IUNG (1:25 000)	baza HWSD (1:1 000 000)	baza FAO-UNESCO (1:5 000 000)

rzystaniem SWAT, co pozwala na porównanie wyników z innymi publikacjami prezentującymi aplikacje modelu (m.in. Gassman i in., 2007; Douglas-Mankin i in., 2010).

Kalibrację struktur modelu SWAT opracowano w oprogramowaniu SWAT-CUP4 (Abbaspour, 2012) na podstawie danych średnich dobowych przepływów z posterunków hydrometrycznych w Tychówku, Białogardzie i Bardach (rys. 1).

Wyniki

Symulacje obiegu wody w zlewni Parsęty przeprowadzono dla okresu 1966-2010, w których lata 1966-1968 przeznaczone były na okres dostosowywania modelu (ang. *warm-up period*), lata 1969-1995 na kalibrację, a lata 1996-2010 na walidację modelu. W pierwszym kroku oceny wyników symulacji weryfikacji poddano wartości podstawowych elementów bilansu wodnego, na które składały się wartości dotyczące sumy opadu, ewapotranspiracji rzeczywistej i odpływu całkowitego. Wyniki weryfikowano dla obszaru całej zlewni Parsęty jako wartości średnie roczne z analizowanych wieloleci okresu kalibracji oraz okresu walidacji.

Dane opadowe są jedną ze zmiennych wejściowych modelu, które podawane są w postaci ciągów dobowych dla poszczególnych lokalizacji stacji i posterunków. Porównując średnie roczne sumy opadu w analizowanych wieloleciach obliczone na podstawie danych ze stacji meteorologicznych (680 mm dla okresu kalibracji, 717 mm dla okresu walidacji) do

wartości symulowanych odnotowano jednak niewielkie różnice na poziomie 1% we wszystkich projektach. Różnice w stosunku do danych pomiarowych wynikać mogą z przyjętego w modelu SWAT sposobu interpolacji danych opadowych, w którym dla każdego centroidu zlewni cząstkowej przypisywana jest najbliższej leżąca stacja meteorologiczna lub posterunek opadowy. Analizując natomiast wartość roczną średnią dla wielolecia ewapotranspiracji rzeczywistej stwierdzono, że symulowane wielkości są niższe niż podawane dla tego regionu w literaturze, w którym wskazywane są wartości rzędu 420–480 mm (Drwał, 1982; Szkutnicka, 1987; Choiński, 1998). Dla okresu kalibracji modelu mieściły się one w zależności od projektu w zakresie 350–367 mm, a dla okresu walidacji w zakresie 364–380 mm. Najwyższe symulowane wartości ewapotranspiracji rzeczywistej stwierdzono w projekcie SWAT_3, najniższe w projekcie SWAT_1. Ocenę wyników dla odpływu całkowitego wykonano na podstawie porównania danych symulowanych z danymi z posterunku hydrometrycznego IMGW w Bardach, który był profilem zamykającym zlewnię. Obliczone na podstawie danych pomiarowych wartości roczne średnie dla wielolecia wysokości odpływu wyniosły dla okresu kalibracji 316 mm, natomiast dla okresu walidacji 309 mm. Według wartości symulowanych najbliższe rzeczywistym wysokości odpływu uzyskano w projekcie SWAT_1, gdzie dla okresu kalibracji było to 307 mm, dla okresu walidacji 297 mm. Największą różnicę w stosunku do danych pomiarowych odnotowano dla projektu SWAT_3, w którym odpływ całkowity wyniósł 282 mm w okresie kalibracji, 271 mm w okresie walidacji.

Dla podstawowych elementów bilansu wodnego stwierdzono zatem różnice w porównaniu do danych obserwowanych na poziomie kilku do kilkunastu procent w zależności od przyjętej struktury modelu SWAT. W celu analizy zróżnicowania przestrzennego składowych obiegu wody opracowano mapy rozkładu przestrzennego symulowanych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej oraz odpływu całkowitego w układzie zlewni cząstkowych (rys. 3 i 4).

Należy zauważyć, że opracowane projekty SWAT różniły się strukturą hydrograficzną pod względem powierzchni zlewni oraz układu zlewni cząstkowych (tab. 2). Jest to bezpośrednio związane ze źródłem danych DEM wykorzystanym na etapie delimitacji sieci rzecznej w aplikacji ArcSWAT.

Tabela 2. Charakterystyki hydrograficzne modelowanych układów sieci rzecznej i zlewni cząstkowych

Projekt	Powierzchnia zlewni [km ²]	Liczba zlewni cząstkowych –	Długość cieków [km]	Gęstość cieków [km · km ⁻²]	Wysokość bezwzględna [m n.p.m.]		
					minimalna	średnia	maksymalna
SWAT_1 (DEM 10 m)	2843,2	810	1720,1	0,6	6,0	90,9	230,0
SWAT_2 (DEM 30 m)	2851,3	768	1605,8	0,6	6,0	90,5	230,0
SWAT_3 (DEM 90 m)	2770,3	664	1466,9	0,5	5,0	94,1	236,0

Porównując uzyskane konfiguracje z danymi z bazy Mapy Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP) najmniejszą różnicę w ogólnej powierzchni zlewni odnotować należy przy zastosowaniu cyfrowego modelu wysokościowego DTED2, która wyniosła jedynie 0,5%. Jednak trzeba zwrócić uwagę, że wododział nie przebiegał na całej długości zgodnie z dany-

mi z bazy MPHP (rys. 3 i 4). W południowej części dorzecza wygenerowana linia wododziału ogranicza powierzchnię zlewni, natomiast w części południowo-wschodniej wododział wykracza poza granicę według MPHP. Według modelu opracowanego na podstawie wektoryzacji map topograficznych różnica powierzchni zlewni w stosunku do danych MPHP wyniosła 0,8%. Linia wododziału była jednak najbardziej zbieżna z referencyjnymi danymi z bazy MPHP (rys. 3 i 4). Największą różnicą charakteryzowała się zlewnia modelowana na podstawie danych SRTM, która wynosiła 3,3%. Znaczne różnice w przebiegu wododziałów widoczne są w tym przypadku w północnej i zachodniej części zlewni (rys. 3 i 4). W północnej części może być to związane z obszarami o bardzo małych spadkach i obszarach płaskich, gdzie poprawna delimitacja układu sieci jest utrudniona (Garbrecht, Martz, 1997).

We wszystkich projektach najwyższe wysokości ewapotranspiracji (zmienna wyjściowa ET) na poziomie 450–500 mm można wskazać dla zlewni cząstkowych położonych w północno-zachodniej części obszaru badań (rys. 3). Najniższe wartości ewapotranspiracji zostały oszacowane w środkowej części zlewni Parsęty, gdzie symulowane wartości mieszczą się w zakresie 250–300 mm. Uzyskany rozkład przestrzenny ściśle koresponduje z występującymi w obszarze badań klasami pokrycia terenu i użytkowania ziemi oraz typami gleb. W zlewniach cząstkowych charakteryzujących się najniższymi wartościami dominują tereny leśne (lasy iglaste i lasy mieszane), a w zlewniach o najwyższych wartościach ewapotranspiracji główny udział stanowią grunty orne oraz łąki. Duże wartości ewapotranspiracji w zlewniach z dominacją łąk i gruntów ornich mogą być związane z płytkim występowaniem wód gruntowych na tych obszarach. Największym zróżnicowaniem wartości ewapotranspiracji w poszczególnych zlewniach cząstkowych charakteryzował się projekt SWAT_1, oparty o dane wysokorozdzielcze. Analizując rozkład przestrzenny symulowanych średnich rocznych wysokości odpływu ze zlewni cząstkowych najniższe wartości notowane są w południowo-wschodniej oraz północno-zachodniej części obszaru badań, natomiast najwyższe w środkowej. Obraz ten koresponduje z rozkładem średnich rocznych wysokości opadu, wskazuje także na zróżnicowanie przestrzenne stylów funkcjonowania całej zlewni, jej zasilania, organizacji i udziału poszczególnych zlewni cząstkowych w kształtowaniu odpływu wody. Można jednocześnie zauważyć, że projekt SWAT_1 charakteryzują większe wysokości odpływu, w porównaniu do pozostałych projektów. Zwłaszcza w południowo-wschodniej części obszaru, gdzie większość zlewni cząstkowych mieści się w przedziale 270–300 mm odpływu wody. W pozostałych projektach jest to przedział 240–270 mm odpływu wody.

Kolejnym etapem analizy wyników symulacji bilansu wodnego była weryfikacja serii czasowych. Ocenie poddano wyniki dotyczące odpływu wody z rocznym krokiem czasowym w okresie kalibracji oraz walidacji modelu. Obliczone na podstawie porównania serii danych symulowanych oraz obserwowanych (profil zamykający zlewnię) statystyki zebrano w tabeli 3. Otrzymane wartości statystyk według kryterium oceny modelu hydrologicznego ze względu na współczynnik determinacji (Sarma i in., 1973) klasyfikują wyniki średnich rocznych odpływu wody ogólnie jako bardzo dobre i dobre. Ocena ta odnosi się zarówno do okresu kalibracji, jak i walidacji modelu. Porównując wartości poszczególnych miar statystycznych niższe oceny wskazywane są według współczynnika efektywności modelu Nasha-Sutcliffe'a (NSE), co wynika także bezpośrednio ze sposobu obliczeń poszczególnych statystyk. Wartości współczynnika odchylenia procentowego mieszczą się w zakresie 3–11% dla okresu kalibracji oraz 4–13% dla okresu walidacji. Wyniki te należy uznać za bardzo dobre i dobre zgodnie z kryterium oceny modelu hydrologicznego według Singha i in.

Tabela 3. Statystyki oceny symulowanych rocznych wartości odpływu wody dla profilu zamykającego zlewnię Parsęty

Projekt	Okres kalibracji			Okres walidacji		
	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
Projekt SWAT_1	0,83	0,77	3,15	0,82	0,76	3,97
Projekt SWAT_2	0,77	0,67	4,37	0,74	0,63	5,67
Projekt SWAT_3	0,60	0,50	10,60	0,59	0,50	12,57

(2004). Jednocześnie należy zauważyć, że są to wartości dodatnie, zatem we wszystkich projektach wielkość odpływu wody była zaniżona. Porównując wyniki w zależności od podziału na okres kalibracji oraz walidacji stwierdzono bardzo małe różnice wartości współczynników oceny, co świadczy o poprawnym określeniu ram czasowych okresu kalibracji i walidacji, poprawnym doborze wartości parametrów podczas procedury kalibracji oraz stabilności przyjętych struktur modelu SWAT.

Uzyskane statystyki oceny wskazują na zróżnicowanie wyników w zależności od wykorzystanych danych wejściowych w poszczególnych projektach. Największą zgodność danych symulowanych z pomiarowymi uzyskano dla projektu SWAT_1, w którym operowano na danych wysokorozdzielczych opartych o warstwę glebową opracowaną na podstawie map glebowo-rolniczych oraz DEM w rozdzielczości 10 m. Zastosowanie danych o bardzo małej rozdzielczości w projekcie SWAT_3, w którym wykorzystywany był DEM o rozdzielczości 90 m oraz mapa glebowa w skali 1:5 000 000, wpłynęło na najsłabsze wyniki. Wpływ na otrzymane rezultaty miał zarówno proces delimitacji sieci rzecznej i zlewni cząstkowych w oparciu o wybrane źródła danych DEM, jak i reprezentacja wydzielen glebowych. Najbardziej zgeneralizowana mapa FAO-UNESCO obejmowała dla badanego obszaru jedynie trzy jednostki, co nie było w pełni wystarczające dla odzwierciedlenia zróżnicowania przestrzennego gleb.

Analizując porównanie danych symulowanych i pomiarowych w poszczególnych latach należy zauważyć, że były one zróżnicowane, a nie był to błąd systematyczny (rys. 2). Szczególnie duże różnice wystąpiły w okresach lat suchych (lata: 1971, 1975, 1989, 1994, 1996) następujących po latach bardzo wilgotnych i wilgotnych. Mocno zaniżone wartości odpływu wody w tych latach potwierdzają dużą bezwładność hydrologiczną rzek w zlewni Parsęty, której model w pełni nie reprezentował. Reakcja zlewni na mniejszą wysokość opadów według modelu SWAT była szybsza, niż według danych pomiarowych.

Wnioski

Zaadaptowany do warunków zlewni młodoglacjalnej model SWAT generował wyniki zgodne z rzeczywistymi wartościami pomiarowymi dla obszaru zlewni Parsęty. Przyjęte struktury modelu charakteryzowały się wysokimi wartościami współczynników oceny statystycznej wyników, co możliwe było dzięki przeprowadzeniu procedury kalibracji. Istotną cechą adaptacji modelu SWAT jest stwierdzona prawidłowość dotycząca stosowania danych przestrzennych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, gwarantujących uzyskanie wyników

symulacji na najlepszym poziomie zgodności z danymi rzeczywistymi. Należy jednak stwierdzić, że przy założeniu tolerancji większych błędów modelu dane średnio- i niskorozdzielcze również mogą być wykorzystywane w symulacjach SWAT, zwłaszcza dla wartości średnich rocznych i miesięcznych. Opracowana baza danych i struktury modelu mogą posłużyć w dalszym etapie prac do przeprowadzenia symulacji uwzględniających scenariusze zmian klimatycznych oraz scenariusze zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi.

Literatura

- Abbaspour K.C., 2012: SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual. Eawag, 103.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R., 1998: Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
- Beven K., 2001: Rainfall-Runoff modelling. The Primer. John Wiley and Sons, UK, Chichester, 360.
- Choiński A., 1998: Warunki obiegu wody w dorzeczu Parsęty. [W:] Kostrzewski A. (red.), Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych 1. Środowisko przyrodnicze dorzecza Parsęty – stan badań, zagospodarowanie, ochrona, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Poznań, 36-51.
- Crawford N.H., Linsley R.K., 1966: Digital simulation in hydrology, Stanford Watershed IV. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, 210.
- Dawdy D.R., O'Donnell T., 1965: Mathematical models of catchment behavior. Am. Soc. Civil Engineers Proc. Paper 4410, HY4: 123-137.
- Douglas-Mankin K.R., Srinivasan R., Arnold J.G., 2010: Soli and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Transactions of the ASABE* 53(5): 1423-1431.
- Drwal J., 1982: Wykształcenie i organizacja sieci hydrograficznej jako podstawa oceny struktury odpływu na terenach młodoglacjalnych. Wydawnictwo UG, Gdańsk, 130.
- FAO/UNESCO, 2003: Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. Rev. 1. (CD Rom). Available from http://www.fao.org/catalog/what_new-e.htm.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012: Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Garbrecht J., Martz L.W., 1997: The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology* 193: 204-213.
- Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G., 2007: The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 50(4): 1211-1250.
- Gassman P.W., Sadeghi A.M., Srinivasan R., 2014: Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality* 43: 1-8.
- Hejmanowska B., 2006: Wpływ jakości danych na modelowanie stref zagrożenia powodziowego. *Roczniki Geomatyki* t. 4, z. 1: 145-150, PTIP, Warszawa.
- Ignar S., 1988: Metoda SCS i jej zastosowanie do wyznaczania opadu efektywnego. *Przegląd Geofizyczny* 33 (4).
- Kostrzewski A., 1998: Struktura krajobrazowa dorzecza Parsęty w oparciu o dotychczasowe podziały fizyczno-geograficzne. [W:] Kostrzewski A. (red.), Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych. Środowisko przyrodnicze dorzecza Parsęty, stan badań, zagospodarowanie, ochrona, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań: 131-141.
- Kostrzewski A., 2003: Obieg wody i jego wpływ na powstanie i funkcjonowanie struktur krajobrazowych. [W:] Kostrzewski A. (red.), Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych. Obieg wody uwarunkowania i skutki w środowisku przyrodniczym, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań: 17-20.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Zwoliński Z., 1994: Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania systemu zlewni. Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, 165.
- Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., Döll P., Jimenez B., Miller K., Oki T., Sen Z., Shiklomanov I., 2008: The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal* 53(1): 3-10.

- Monteith J.L., 1965: Evaporation and the environment. [In:] The State and Movement of Water in Living Organisms. Proc. 19th Symp. Swansea, U.K.: Society of Experimental Biology, Cambridge University Press.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2011: Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2009. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P., 1991: RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46(1).
- Rockwood D.M., 1964: Streamflow synthesis and reservoir regulation. U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Technical Bulletin no. 22: 98.
- Sarma P.B.S., Delleur J.W., Rao A.R., 1973: Comparison of rainfall-runoff models for urban areas. *Journal of Hydrology* 18(3-4): 329-347.
- Singh J., Knapp H.V., Demissie M., 2004: Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association* 41: 343-360.
- Sugarawa M., 1967: The flood forecasting by series storage type model. IAHS, 85: 1-6.
- Szkutnicka J., 1987: PIHM. 105, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- USDA Soil Conservation Service, 1972: Section 4. Hydrology. [W:] National Engineering Handbook, US. Department of Agriculture-Soil Conservation Service, Washington.
- Williams J.R., 1975: Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. [W:] Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, 244-252.
- Zwoliński Z., 1989: Geomorficzne dostosowywanie się koryta Parsęty do aktualnego reżimu rzecznoego. Dokumentacja Geograficzna 3-4, IGiPZ PAN: 144.
- Zwoliński Z., 2010: Przedmowa. [W:] Zwoliński Z. (red.), GIS – woda w środowisku. Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań: 9-10.
- Zwoliński Z., 2011: Globalne zmiany klimatu i ich implikacje dla rzeźby Polski. *Landform Analysis* 15: 5-15.

Streszczenie

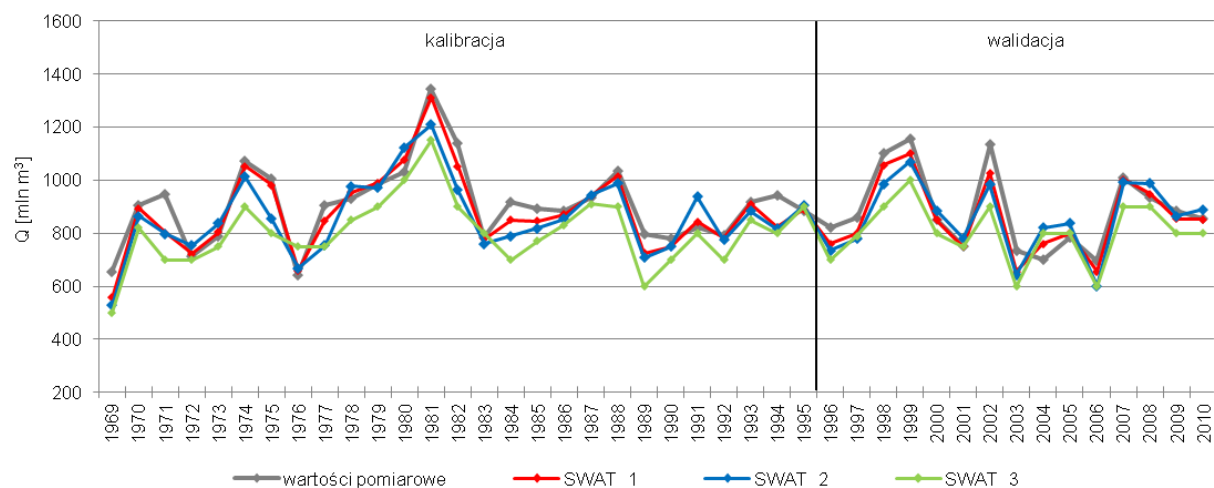
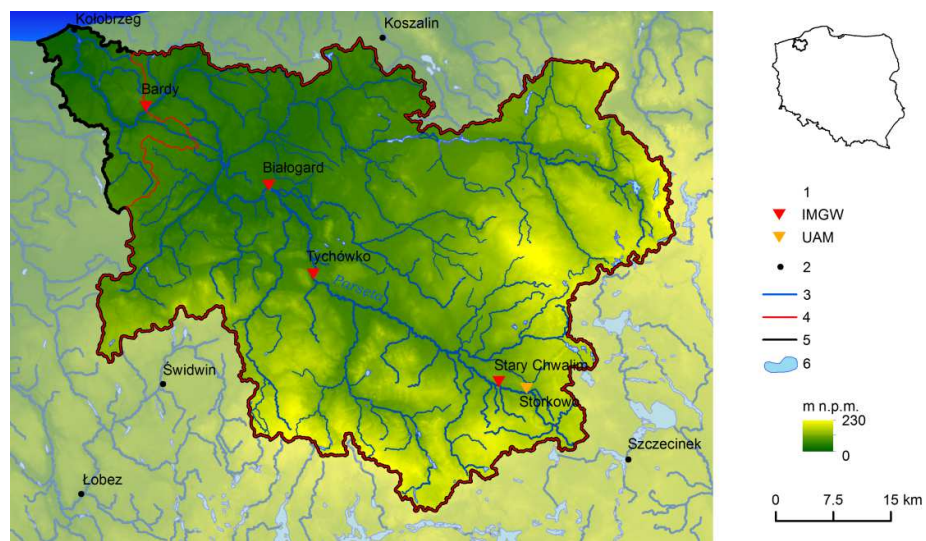
Numeryczne modele hydrologiczne i jakości wody bazujące na systemach informacji geograficznej wykorzystują różnorodne dane przestrzenne. Celem prac była ocena w jakim stopniu wyniki symulacji obiegu wody wykonane za pomocą modelu SWAT (Soil and Water Assessment Tool) są zależne od jakości danych wejściowych. Badaniem objęta została zlewnia Parsęty, która ze względu na jej wewnętrzną strukturę uważana jest za reprezentatywną dla obszarów młodoglacjalnych umiarkowanej strefy klimatycznej. W badaniach wykorzystano trzy różne źródła danych wysokościowych (DEM) oraz danych glebowych. W symulacjach uwzględniono dane meteorologiczne z wieloletnia 1966-2010 pochodzące z 4 stacji meteorologicznych i 10 posterunków opadowych. Uwzględniono także zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi jakie zaszły w analizowanym okresie przez wykorzystanie map z czterech horyzontów czasowych (1975, 1990, 2000, 2006). Kalibrację i walidację modelu przeprowadzono wykorzystując dane pomiarowe IMGW z trzech posterunków hydrometrycznych na Parsęcie. Uzyskane wyniki pozwoliły na analizę zróżnicowania przestrzennego elementów bilansu wodnego oraz analizę serii czasowych odpływu wody. Wyniki poddane zostały ocenie przy zastosowaniu współczynników statystycznych: determinacji R^2 , efektywności modelu Nasha-Sutcliffe'a (NSE) oraz współczynnika odchylenia procentowego (PBIAS). Otrzymane rezultaty modelowania były zróżnicowane w zależności od wykorzystanych danych wejściowych. Największą zgodność danych symulowanych z pomiarowymi uzyskano wykorzystując dane charakteryzujące się wysoką dokładnością przestrzenną i tematyczną.

Abstract

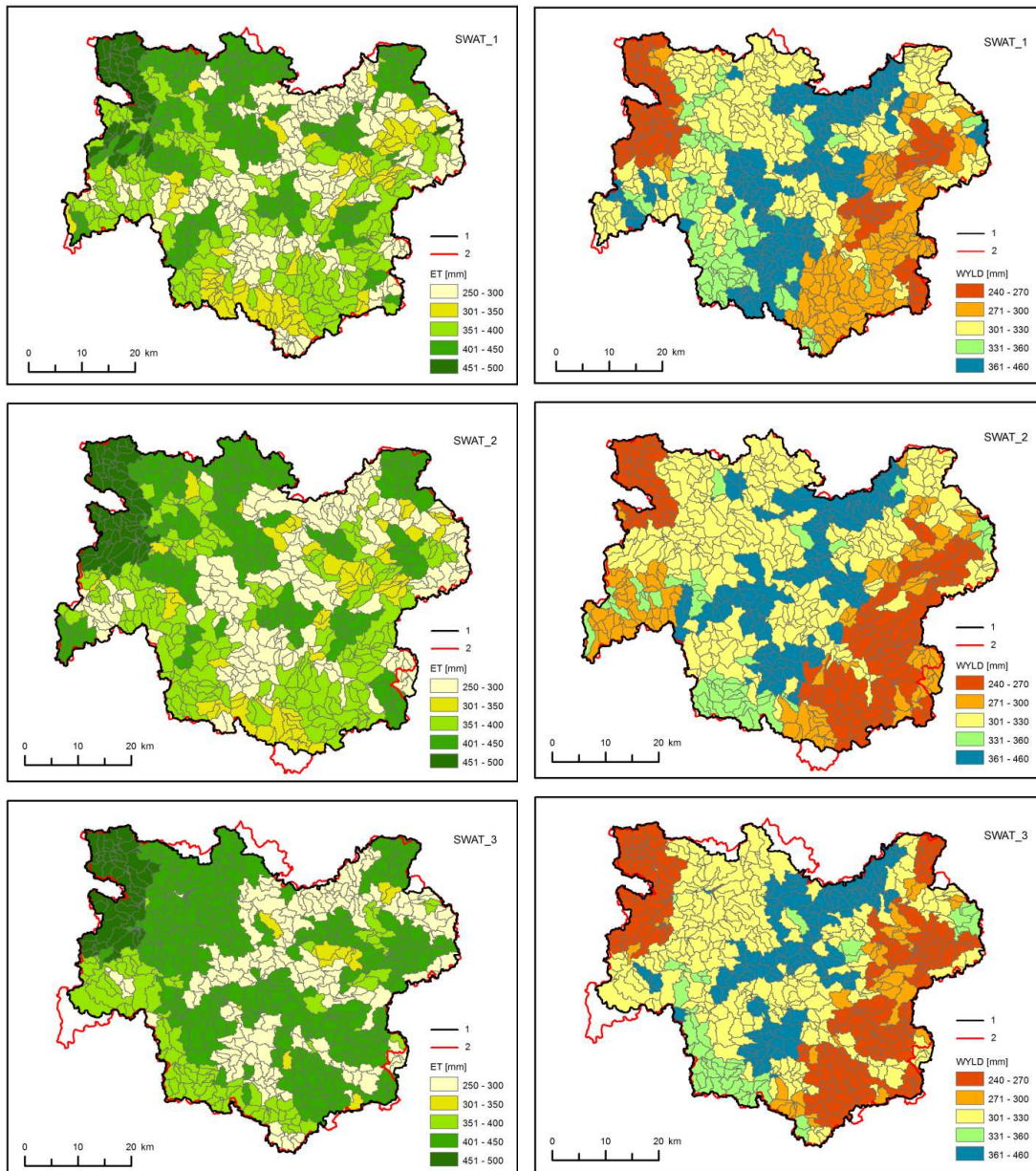
GIS-based hydrological and water quality models are based on the use of a variety of spatial data. The aim of this study was to assess whether the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) simulation results are dependent on the quality of input data. The subject of the research covered the Parsęta drainage basin which in view of its internal structure is considered representative for the last glacial lowlands within the temperate climatic zone. Three different sources of DEM and soil data were used in the study. The simulations included meteorological data for the years 1966-2010 from 4 meteorological stations and 10 precipitation stations. Land cover and land use changes that took place in the analyzed period were included owing to application of maps originating from four time periods (1975, 1990, 2000, 2006). Calibration and validation was performed on the basis of the data collected by the Institute of Meteorology and Water Management at three water gauging stations on the Parsęta river. The results allowed the analysis of the spatial diversity of water balance elements and variability analysis of time series of water outflow. The results were subject to assessment by statistical methods: R^2 determination coefficient, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), percent bias coefficient (PBIAS). The obtained results varied depending on the applied input data. The best consistency of the simulated data with the measurement data was obtained using data with the high spatial and thematic accuracy.

dr Joanna Gudowicz
gudowicz@amu.edu.pl

Rysunek 1. Położenie obszaru badań (na podstawie danych DTED2 oraz Mapy Podziału Hydrograficznego Polski, MPHP);
 oznaczenia: 1 – posterunki hydrometryczne,
 2 – miasta, 3 – rzeki, 4 – obszar badań,
 5 – dorzecze Parsęty, 6 – zbiorniki wodne



Rysunek 2. Porównanie pomiarowych i symulowanych wartości rocznego odpływu wody dla profilu zamykającego zlewnię Parsęty w Bardach



Rysunek 3. Przestrzenny rozkład symulowanych średnich rocznych wartości ewapotranspiracji rzeczywistej – zmienna ET; oznaczenia:
 1 – zlewnia Parsęty wg danych DEM;
 2 – zlewnia Parsęty według danych MPHP

Rysunek 4. Przestrzenny rozkład symulowanych średnich rocznych wysokości odpływu wody – zmienna WYLD; oznaczenia:
 1 – zlewnia Parsęty według danych DEM;
 2 – zlewnia Parsęty według danych MPHP