

Kształtowanie się odpływu rzecznego w dorzeczu Parsęty w świetle modelowania hydrologicznego

*Shaping of river outflow in the Parsęta basin in the light
of hydrological modelling*

JOANNA GUDOWICZ, ZBIGNIEW ZWOLIŃSKI

Instytut Geoeologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza,
61-680 Poznań, ul. B. Krygowskiego 10; gudowicz@amu.edu.pl, zbw@amu.edu.pl

Zarys treści. Celem pracy jest oszacowanie zmienności czasowej i zróżnicowania przestrzennego odpływu rzecznego z wykorzystaniem zintegrowanych metod geoinformacyjnych z modelowaniem hydrologicznym. Badania przeprowadzono w dorzeczu Parsęty wykorzystując dane z trzech profili wodowskazowych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej dotyczące okresu 1966-2010. Symulacje bilansu wodnego wykonano z zastosowaniem modelu SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Symulowane wartości odpływu porównano z danymi pomiarowymi. Stwierdzono, że najbardziej zgodne z danymi obserwowanymi były wyniki modelowania otrzymane dla profilu zamykającego dorzecze, natomiast przy mniejszych obszarach zasilania uzyskiwano niższe wartości współczynników statystycznych oceny wyników. Zastosowanie modelu SWAT na rzece nizinnej obszaru młodogłacjalnego potwierdziło jego uniwersalne możliwości stosowania dla zlewni o zróżnicowanych warunkach środowiskowych i reżimie rzeczny.

Słowa kluczowe: odpływ rzeczny, modelowanie hydrologiczne, Parsęta, Pomorze

Wprowadzenie

Obieg wody i materii, zmienny w czasie i przestrzeni, określa współczesny rozwój środowiska przyrodniczego umiarkowanej strefy klimatycznej (Kostrzewski, 2003). Poznanie procesów obiegu wody na tle warunków środowiskowych oraz w ścisłym powiązaniu z ich zmiennością jest jednym z najważniejszych ogniw rozpoznania zasad funkcjonowania współczesnych geosystemów (Kostrzewski i inni, 1994). Odpływ ze zlewni rzecznej uzależniony jest od właściwości środowiska przyrodniczego, w tym przede wszystkim litologii utworów powierzchniowych, rzeźby terenu, przebiegu i natężenia opadów atmosferycznych, struktury pokrycia terenu i użytkowania ziemi oraz działalności człowieka.

Zastosowanie podejścia systemowego i metod modelowania odgrywa istotną rolę we współczesnym poszukiwaniu nowych wymiarów poznawczych i przyczynia się do weryfikacji hipotez teoretycznych, niezbędnych do poznania i prognozowania ilościowych i jakościowych procesów w geosystemie (Gutry-Korycka, 1999). Komputerowe modele hydrologiczne zaczęto konstruować w latach 1960. (m.in. Crawford i Linsley, 1966), a na przestrzeni kolejnych dekad opracowano wiele integralnych modeli obiegu wody, które holistycznie obejmują większość zachodzących w zlewni procesów (Beven, 2001). Podsumowanie statusu numerycznych modeli hydrologicznych obiegu wody wskazuje na ciągły ich rozwój, oparty na zasadach fizyki, na parametrach przestrzennie rozłożonych, na rozwoju metod kalibracji i oceny niepewności modeli oraz na integracji modeli z systemami informacji geograficznej (Daniel i inni, 2011; Pechlivanidis i inni, 2011; Moriasi i inni, 2012). Należy wskazać, że w rozwoju koncepcji modelowych uwzględnia się także procesy związane z transportem osadów oraz odpływem roztworów, biogenów, nutrietów itp. (Zwoliński, 1989; Newham i inni, 2004; Aksoy i Kavvas, 2005). Takie powiązanie odpływu wody z odpływem osadów i roztworów Z. Zwoliński (1986, 1989) określa mianem reżimu rzeczno wyrażonego kooperacją przepływową. Kierunkiem rozwojowym modeli hydrologicznych jest także ich zastosowanie w badaniach wpływu zmian klimatu na bilans wodny (Geethalakshmi i inni, 2008; Surfleet i inni, 2012). Poprawnie skonstruowany i zweryfikowany model może umożliwić badanie różnych scenariuszy rozwoju geosystemu zlewni i przemian środowiskowych, które niezbędne są np. w planowaniu przestrzennym.

Celem pracy jest oszacowanie zmienności czasowej i zróżnicowania przestrzennego odpływu rzeczno w dorzeczu Parsęty z wykorzystaniem zintegrowanych metod geoinformacyjnych oraz modelowania hydrologicznego. W modelowaniu wykorzystano program SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (Arnold i inni, 1998), który jest obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych modeli hydrologicznych odpływu i jakości wody (Gassman i inni, 2014; Krysanova i White, 2015), znajdującym zastosowanie w szerokim spektrum środowiskowym. Model SWAT przeznaczony jest m.in. do prognozowania wpływu zmian zagospodarowania zlewni (użytkowanie terenu, agrotechnika, melioracje, urbanizacja, itp.) na bilans wody, osadów i biogenów oraz różnorodnych zanieczyszczeń. Był testowany w setkach lokalizacji na wszystkich kontynentach i praktycznie w każdych warunkach klimatycznych i glebowych, natomiast w Polsce wykorzystywany jest od kilku lat w odniesieniu do różnych zlewni (Bogdanowicz i inni, 2010; Walczykiewicz, 2010; Brzozowski i inni, 2011; Piniewski, 2012; Piniewski i inni, 2015; Berezowski i inni, 2016). Model ma charakter fizyczny (deterministyczny), a ze względu na wysoką efektywność obliczeniową umożliwia wykonywanie ciągłych symulacji dla długich przedziałów czasu (Gassman i inni, 2007).

Materiały i metodyka

Opracowanie bazy danych

Na potrzeby badań pozyskano dane przestrzenne z różnych źródeł, które zintegrowano w geobazie File Geodatabase/ArcGIS. Zebrane w geobazie dane posłużyły do wskazania i analizy warunków fizycznogeograficznych dorzecza Parsęty, ważnych z punktu widzenia obiegu wody. Wybrane zestawy danych były podstawą przeprowadzenia symulacji bilansu wodnego w modelu SWAT. Zgromadzone dane obejmowały następujące zestawy:

- cyfrowy model wysokościowy o rozdzielczości 10 m – DEM utworzony na podstawie interpolacji wartości poziomic pochodzących z wektoryzacji map topograficznych w skali 1:10 000 opracowanych przez Głównego Geodetę Kraju;
- litologia – dane wektorowe z bazy Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski (SMGP) w skali 1:50 000 pozyskane z Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego;
- sieć hydrograficzna – dane wektorowe z bazy Komputerowej Mapy Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP, 2010) w skali 1:50 000 pozyskane z Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej;
- dane hydrologiczne – pozyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (dobowe przepływy wody) z 3 profili hydrometrycznych zlokalizowanych na Parsęcie, tj. Bardy, Białogard, Tychówko dla lat 1966-2010;
- dane meteorologiczne – z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (zmienne obejmowały: sumę dobową opadów, maksymalną i minimalną temperaturę dobową powietrza, średnią dobową wilgotność względną, średnią dobową prędkość wiatru) dla czterech stacji meteorologicznych, tj. Kołobrzeg, Koszalin, Resko, Szczecinek dla lat 1966-2010;
- typy gleb – z map glebowo-rolniczych Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach otrzymanych z Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Szczecinie (skala 1:25 000);
- typy pokrycia terenu i użytkowania ziemi – dane wektorowe pozyskane z baz *Corine Land Cover* 1990 (CLC1990), 2000 (CLC2000), 2006 (CLC2006) w skali 1:100 000, których właścicielem jest Główny Inspektorat Ochrony Środowiska; ponadto dane pozyskano na podstawie wektoryzacji mapy topograficznej w skali 1:100 000 opracowanych przez Głównego Geodetę Kraju.

Charakterystyka modelu

Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT, Arnold i inni, 1998) jest modelem z czasem ciągłym, w którym obliczenia wykonywane są z zadaniem krokiem czasowym w skali zlewni rzecznej. Model ten wymaga jako podstawowych danych wejściowych: cyfrowego modelu wysokościowego, mapy glebowej, mapy pokrycia terenu i użytkowania ziemi oraz danych meteorologicznych. Na podstawie danych DEM wykonano delimitację cieków i zlewni cząstkowych z wykorzystaniem algorytmu D8 (O'Callaghan i Mark, 1984; Winchell i inni, 2011). Na podstawie mapy glebowo-rolniczej, uzupełnionej o treści litologiczne ze szczegółowej mapy geologicznej, zgromadzono w bazie danych wymagane przez model SWAT parametry fizyczne wyróżnionych wydzieleni glebowych, takie jak grupa hydrologiczna gleby, maksymalna głębokość ukorzenia, głębokość profilu glebowego, gęstość objętościowa, nasycona przewodność hydrauliczna, zawartość węgla organicznego, zawartość ilu, zawartość pyłów, zawartość piasków, zawartość części szkieletowych, współczynnik erozyjności gleby. Wymagane właściwości fizyczne opracowano według składu granulometrycznego. Grupy hydrologiczne przypisano zgodnie z klasyfikacją przedstawioną przez S. Ignara (1988) w adaptacji metody SCS do warunków polskich. Współczynnik erozyjności został określony według metody zaproponowanej przez K.G. Renarda i innych (1991). Mapa pokrycia terenu i użytkowania ziemi wymagała reklasyfikacji do kategorii, które zawarte są w wymaganiach bazy danych parametrów modelu SWAT. Do podstawowych danych wejściowych do modelu SWAT należą także dane meteorologiczne, które uwzględniono jako dane dobowe oraz jako statystyki z wielolecia. Statystyki wieloletnie należało obliczyć dla poszczególnych miesięcy, w odniesieniu do następujących charakterystyk: średnia maksymalnych temperatur dobowych powietrza, średnia minimalnych temperatur dobowych powietrza, odchylenie standardowe maksymalnych temperatur dobowych powietrza, odchylenie standardowe minimalnych temperatur dobowych powietrza, średnia wysokość opadu w miesiącu, odchylenie standardowe dobowych wysokości opadu, współczynnik skośności dobowych wysokości opadu, prawdopodobieństwo wystąpienia dnia z opadem po dniu suchym, prawdopodobieństwo wystąpienia dnia suchego po dniu z opadem, średnia liczba dni z opadem w miesiącu, wysokość maksymalnego opadu 30-minutowego, średnia dobowych wartości promieniowania słonecznego, średnia dobowych wartości temperatury punktu rosy, średnia dobowych wartości prędkości wiatru. Dane dotyczące dobowych przepływów wody z trzech profili wodowskazowych w Bardach, Białogardzie i Tychówku posłużyły do kalibracji i weryfikacji wyników modelowania.

Wstępny etap oceny wyników symulacji polegał na analizie wartości podstawowych elementów bilansu wodnego dla całego okresu kalibracji oraz walidacji modelu, na które składały się wartości dotyczące sumy opadu, odpływu

całkowitego i ewapotranspiracji rzeczywistej, a także wartości opadu i topnienia śniegu, spływu powierzchniowego, odpływu podpowierzchniowego, odpływu podziemnego, perkolacji i ewapotranspiracji potencjalnej, a więc większość parametrów zawartych w modelu koncepcyjnym funkcjonowania systemu denudacyjnego zlewni rzecznej na obszarze młodoglacjalnym, zaproponowanym przez A. Kostrzewskiego i innych (1994). W artykule omówiono wyniki dotyczące odpływu całkowitego. W drugim etapie ocenę wyników modelowania wykonano na podstawie współczynników statystycznych: determinacji R^2 , efektywności modelu Nasha-Sutcliffe'a (ang. *Nash-Sutcliffe Efficiency*, NSE) oraz współczynnika odchylenia procentowego (ang. *percentage of bias*, PBIAS). Ocenie statystycznej poddano wyniki dotyczące odpływu wody z rocznym krokiem czasowym w okresie kalibracji oraz walidacji modelu. Przy ocenie współczynnika determinacji R^2 posłużono się klasyfikacją zaproponowaną przez P.B.S. Sarmę i innych (1973). Opierając się na współczynniku efektywności modelu (NSE) oraz współczynniku odchylenia procentowego (PBIAS) zastosowano kryterium zgodności modelu hydrologicznego według klasyfikacji zaproponowanej w pracy Singha i innych (2004).

Do obliczeń wykorzystano wersję modelu SWAT2009 (Neitsch i inni, 2011) zintegrowanego z oprogramowaniem ArcGIS poprzez rozszerzenie ArcSWAT (Winchell i inni, 2011). Z zaimplementowanych w modelu metod zastosowano m.in. metodę szacowania opadu efektywnego (ang. *Soil Conservation Service Curve Number*, SCS-CN) (USDA-SCS, 1972), metodę szacowania ewapotranspiracji Penmana Monteitha (Monteith, 1965) i metodę Muskingum do obliczeń przepływu wody w korycie (Neitsch i inni, 2011). Metody te są stosowane w modelu SWAT jako standardowe (Neitsch i inni, 2011). Spływ powierzchniowy w modelu może być także wyznaczany za pomocą metody szacowania infiltracji Green-Ampt (Greek i Ampt, 1911). Do metody Green-Ampt niezbędne są jednak dane opadowe o rozdzielczości większej niż jedna doba. Do szacowania ewapotranspiracji dostępne są również metody Priestleya-Taylor (Priestly, Taylor, 1972) i Hargreavesa (Hargreaves i inni, 1985). Ponadto model wymagał przeprowadzenia procedury kalibracji, którą wykonano w oprogramowaniu SWAT-CUP4 (Abbaspour, 2012) z wykorzystaniem procedury *Sequential Uncertainty Fitting* (SUF2) (Abbaspour i inni, 2004). Kalibracji poddano następujące parametry: stała recesji zasilania cieków wodą gruntową, wartość progowa ilości wody w płytkim poziomie wodonośnym powyżej, której pojawia się zasilanie cieków wodą gruntową, współczynnik podsiąku wód gruntowych, parametr CN w metodzie SCS, głębokość zalegania wody w płytkiej warstwie wodonośnej, w której występuje przesiąkanie lub perkolacja do głębszych warstw wodonośnych, opóźnienie dopływu wód gruntowych, przewodnictwo hydrauliczne podłoża koryta, współczynnik kompensacji ewaporacji glebowej, współczynnik opóźnienia spływu powierzchniowego.

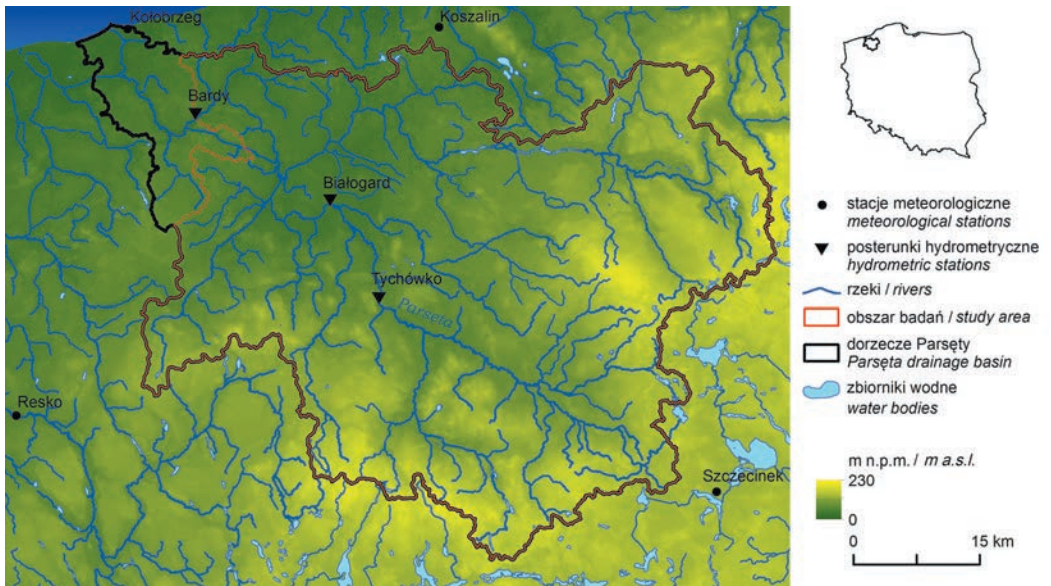
Obszar badań

Dorzecze Parsęty należy do zlewiska Morza Bałtyckiego. Obejmuje prawie cały obszar Pomorza Środkowego i jest największe wśród zlewni rzek Przymorza Bałtyku (Zwoliński, 1989). Powierzchnia dorzecza obliczona na podstawie Mapy Podziału Hydrograficznego Polski (2010) wynosi 3 067 km². Obszar dorzecza wedle podziału fizyczno-geograficznego Polski (Kondracki, 2000) położony jest w obrębie dwóch makroregionów: Pobrzeża Szczecińskiego (około 90%) i Pojezierza Zachodniopomorskiego (10%).

Dorzecze Parsęty reprezentuje geosystem obszaru nizinnego, młodogłacjalnego położonego w umiarkowanej strefie klimatycznej. Reprezentatywność zlewni dla obszarów młodogłacjalnych umiarkowanej strefy klimatycznej określa jej położenie w zasięgu form pogłacjalnych oraz mozaikowy układ litologii utworów powierzchniowych, struktury gleb, pokrycia terenu i użytkowania ziemi (Kostrzewski, 1998).

Struktura hydrograficzna zlewni obszarów młodogłacjalnych stanowi jeden z podstawowych czynników kształtujących obieg wody oraz materii w zlewni (Fac-Beneda, 2011). Rzeki w dorzeczu Parsęty wykorzystują odcinki równoleżnikowe Pradoliny Pomorskiej na przemian z odcinkami przełomowymi (Zwoliński, 1989), które łączą odcinki rynnowe, baseny lub odcinki o charakterze wytopiskowym. Cechą charakterystyczną są stosunkowo krótkie profile podłużne rzek z wysokimi spadkami w górnych biegach. Kształt dorzecza odznacza się silnym zwężeniem ku ujściu wynikającym z małej ilości dopływów na tym obszarze (ryc. 1). Wyjątkową cechą dorzecza Parsęty jest niewielka liczba jezior. Dużą rolę odgrywają liczne obszary stale lub okresowo bezodpływowe, wyłączone z powierzchniowego systemu odwadniania (Kostrzewski i inni, 1994).

Długość Parsęty na podstawie danych MPHP (2010) wynosi 142,8 km. Średni spadek rzeki wynosi 0,96‰, przy czym w górnym biegu osiąga 3‰, wskazując na duże możliwości działalności erozyjnej i znacznego transportu osadów (Karczewski, 1998). Badaniami objęto zlewnię do profilu zamykającego w Bardach, 25,0 km od ujścia rzeki do Morza Bałtyckiego (ryc. 1). Obszar badanej zlewni obliczony na podstawie danych MPHP wynosi 2 866 km², co stanowi 93,4% powierzchni całego dorzecza Parsęty. Długość rzeki do profilu hydrometrycznego w Bardach wynosi 117,8 km. Krętość rzeki określa ją jako meandrującą i wynosi 1,55 (Zwoliński, 1989). Charakterystyki morfometryczne i hydrograficzne obliczone na podstawie cyfrowego modelu wysokościowego oraz danych z bazy MPHP (2010) dla obszaru całego dorzecza oraz dla obszaru badań zebrano w tabeli 1.



Ryc. 1. Położenie obszaru badań

Location of the study area

Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny oraz tabele / Authors' own elaboration, as with remaining figures and tables.

Tabela 1. Charakterystyki morfometryczne i hydrograficzne obszaru badań na podstawie analizy DEM oraz danych hydrograficznych (MPHP, 2010)

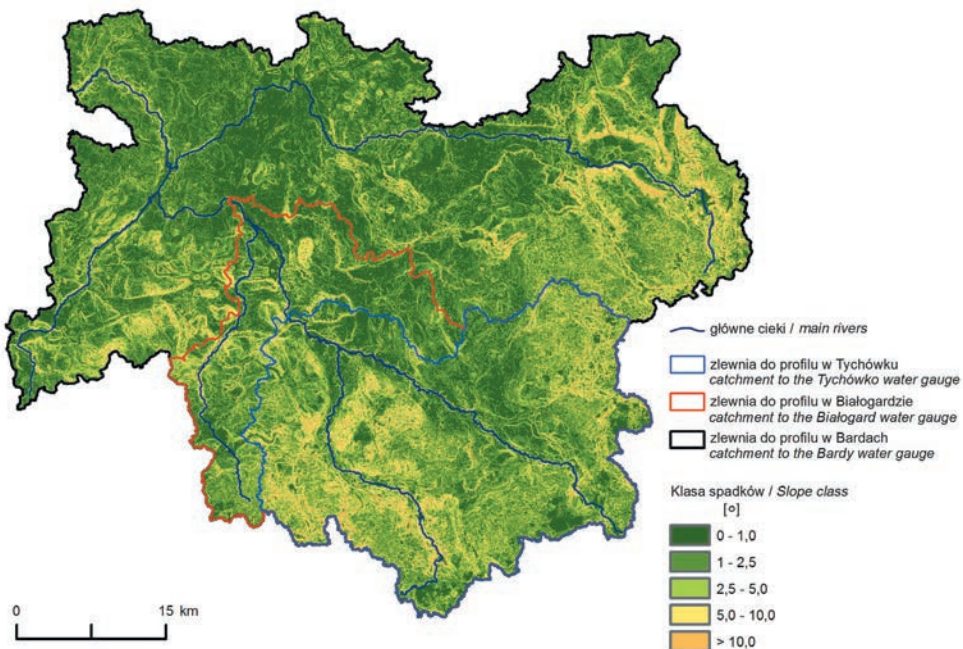
Morphometric and hydrographic characteristics of the study area on the basis of DEM analysis and hydrographic data (MPHP, 2010)

Parametr <i>Parameter</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Jednostka przestrzenna <i>Spatial unit</i>		Udział <i>Share</i> %
		całe dorzecze Parsęty <i>entire Parsęta drainage basin</i>	zlewnia objęta badaniami <i>catchment under investigation</i>	
Powierzchnia	km ²	3067,0	2866,0	93,4
Wysokość bezwzględna	minimalna	0,0	6,0	–
	średnia	86,5	90,7	–
	maksymalna	230,0	230,0	–
Średni spadek	(°)	1,8	1,8	–
Długość sieci hydrogr.	km	4051,6	3805,2	93,9
Gęstość sieci hydrogr.	km km ⁻²	1,3	1,3	–

Uwarunkowania fizycznogeograficzne odpływu wody

Rzeźba

Współczesna rzeźba terenu dorzecza Parsęty jest efektem glacialnego, peryglacialnego i holocenijskiego systemu morfogenetycznego. Przeważająca część dorzecza położona jest na obszarze Pobrzeża Szczecińskiego. Najbardziej południowa i południowo-wschodnia część zlewni znajduje się w zasięgu garbu pojeziernego, który równocześnie wyznacza strefę marginalną fazy pomorskiej zlodowacenia Wisły (Karczewski, 1998). Rzeźbę charakteryzuje duże zróżnicowanie hipsometryczne, w związku z czym na etapie obliczania jednostek reakcji hydrologicznej czy inaczej jednorodnych jednostek zasilania (ang. *hydrologic response units, HRU*) w aplikacji ArcSWAT przyjęto podział na pięć klas spadków. Klasy spadków wyznaczono na podstawie metody klasyfikacji wg naturalnego podziału (ang. *natural breaks – Jenks*) (Jenks, 1967) (ryc. 2). Metoda ta zapewnia uzyskanie takich granic przedziałów, aby dane wewnątrzgrupowe były jak najmniej zróżnicowane a jednocześnie poszczególne grupy miały jak największe odległości międzygrupowe. Największą powierzchniowo klasę spadków,



Ryc. 2. Mapa spadków obszaru badań
Slope map of study area

zarówno w całym obszarze badań jak i w dwóch analizowanych zlewniach cząstkowych zajmują tereny słabo nachylone, o spadkach 1,0-2,5° (tab. 2).

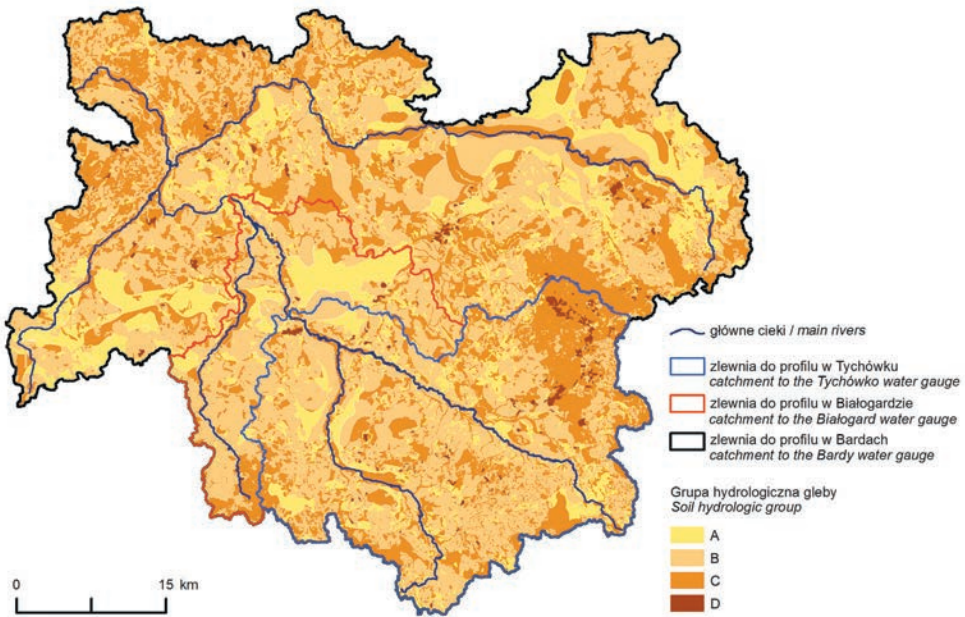
Tabela 2. Udział procentowy (%) klas spadków w powierzchni zlewni różnicowych do profilów hydrometrycznych w Tychówku, Białogardzie i Bardach
Percentage shares of slope classes in differential catchment areas as far as the hydrometric stations in Tychówko, Białogard and Bardy

Klasa spadków <i>Slope class</i> (°)	Udział w powierzchni zlewni / <i>Share in the catchment area</i> (%)		
	wodowskaz Tychówko <i>Tychówko water gauge</i> (899 km ²)	wodowskaz Białogard <i>Białogard water gauge</i> (1224 km ²)	wodowskaz Bardy <i>Bardy water gauge</i> (2866 km ²)
0-1	22,73	26,30	32,34
1-2,5	33,27	34,09	34,94
2,5-5	27,22	25,05	21,00
5-10	13,72	11,97	9,48
>10	3,06	2,58	2,24

Typy gleb

Gleby dorzecza Parsęty charakteryzuje duże zróżnicowanie przestrzenne pod względem typów. Jest ono wynikiem kształtowania się gleb na urozmaiconej litologicznie i morfologicznie pokrywie utworów młodoglacjalnych (Zwoliński 1989; Kostrzewski i inni 1994). Z utworami bezpośredniej akumulacji glacialnej związane są gleby w obrębie wzgórz moren czołowych i kemowych, falistych na ogół powierzchni moreny dennej oraz często występujących form szczelinowych. Z akumulacją fluwioglacjalną można wiązać gleby na obszarach zastoisk, sandrów, zagłębień wytopiskowych oraz we fragmentach Pradoliny Pomorskiej, a z osadami holocenijskimi – pokrywy glebowe w dolinach rzecznych, w części zagłębień wytopiskowych, w rozcięciach erozyjnych i stożkach napływowych.

Wymagane w modelu SWAT właściwości fizyczne gleb opracowano na podstawie ich składu granulometrycznego zaczerpniętego z map glebowo-rolniczych. Na obszarze dorzecza wyróżniono 23 grupy granulometryczne. W związku z zastosowaniem w modelu metody SCS-CN wydzielenia te sklasyfikowano według grup hydrologicznych (Ignar, 1988) (ryc. 3). Największy obszar zajmują gleby o średnim współczynniku filtracji (tab. 3).



Ryc. 3. Mapa gleb według grup hydrologicznych w obszarze badań. Symbole w tabeli 3
Soil map by hydrological groups in the study area

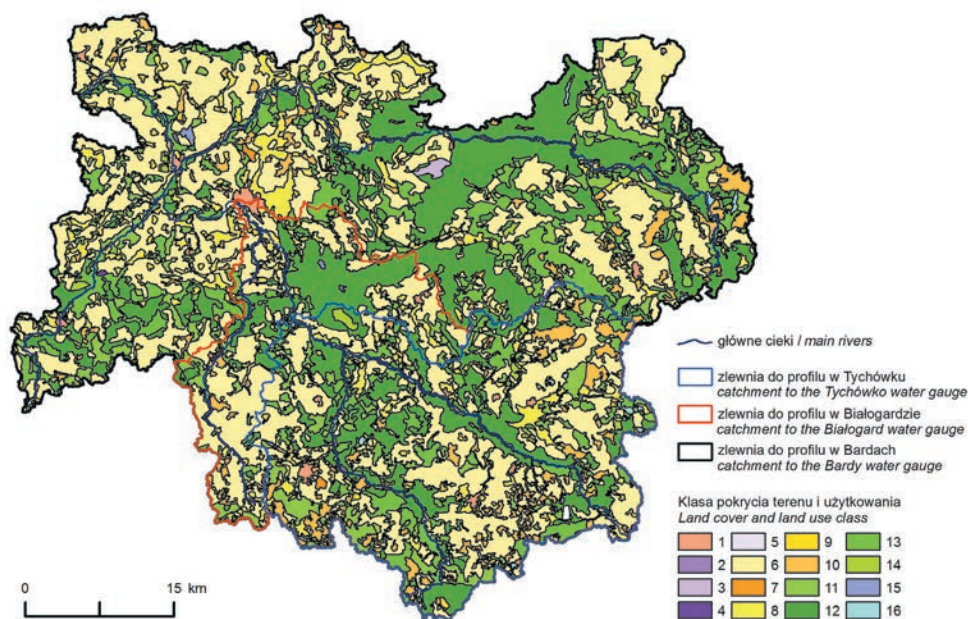
Tabela 3. Udział procentowy (%) grup hydrologicznych gleby w powierzchniach zlewni różnicowych do profilu hydrometrycznego w Tychówku, Białogardzie i Bardach

Percentage shares (%) accounted for by the soil hydrological groups in the differential catchment areas as far as the hydrometric stations in Tychówko, Białogard and Bardy

Grupa hydrologiczna gleby <i>Soil hydrologic group</i>	Udział w powierzchni zlewni <i>Share in the catchment area</i> (%)		
	wodowskaz Tychówko <i>Tychówko</i> <i>water gauge</i> (899 km ²)	wodowskaz Białogard <i>Białogard</i> <i>water gauge</i> (1224 km ²)	wodowskaz Bardy <i>Bardy</i> <i>water gauge</i> (2866 km ²)
A – duży współczynnik filtracji $k > 7,6 \text{ mm h}^{-1}$	13,00	22,88	19,20
B – średni współczynnik filtracji $3,8 < k \leq 7,6 \text{ mm h}^{-1}$	54,25	50,01	47,77
C – współczynnik filtracji poniżej średniej $1,3 < k \leq 3,8 \text{ mm h}^{-1}$	30,95	25,89	32,15
D – mały współczynnik filtracji $k \leq 1,3 \text{ mm h}^{-1}$	1,80	1,22	0,88

Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi

Pod względem struktury pokrycia terenu i użytkowania ziemi dorzecze Parsęty jest obszarem rolniczo-leśnym (ryc. 4). Zmiany struktury w okresie 1975-2006 określone na podstawie analizowanych materiałów kartograficznych są niewielkie i dotyczą głównie zalesiania obszarów wyłączanych spod użytkowania rolniczego. Powierzchnia gruntów ornych zmniejszyła się z 42,3% do 40,6%. Zwiększyła się natomiast powierzchnia obszarów leśnych – z 40,5% do 43,4%. Zauważyć można także niewielki spadek udziału powierzchni łąk oraz sadów i plantacji. Udział poszczególnych klas w powierzchni zlewni do profilu



Ryc. 4. Mapa pokrycia terenu i użytkowania ziemi w obszarze badań (na podstawie danych Corine Land Cover 2006)

Klasy pokrycia: 1 – zabudowa luźna, 2 – strefy przemysłowe lub handlowe, 3 – lotniska, 4 – miejsca eksploatacji odkrywkowej, 5 – tereny sportowe i wypoczynkowe, 6 – grunty orne, 7 – sady i plantacje, 8 – łąki, 9 – złożone systemy upraw i działek, 10 – tereny głównie zajęte przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej, 11 – lasy liściaste, 12 – lasy iglaste, 13 – lasy mieszane, 14 – lasy w stanie zmian, 15 – bagna śródlądowe i torfowiska, 16 – zbiorniki wodne

Map of land cover and land use in the study area (based on Corine Land Cover 2006)

Classes of cover: 1 – loosely built-up area, 2 – industrial or commercial zones, 3 – airports, 4 – mineral extraction sites, 5 – sport and leisure facilities, 6 – arable land, 7 – orchards and plantations, 8 – meadows and pastures, 9 – complex cultivation, 10 – land principally occupied by agriculture, though with a high proportion of natural vegetation, 11 – broadleaved forest, 12 – coniferous forest, 13 – mixed forest, 14 – transitional woodland, 15 – inland marshes and peatlands, 16 – bodies of water

w Tychówku oraz do profilu w Białogardzie jest bardzo zbliżony do struktury pokrycia na obszarze całej zlewni do profilu zamykającego w Bardach (tab. 4).

Tabela 4. Udział procentowy (%) klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi w powierzchniach zlewni różnicowych do profilu hydrometrycznego w Tychówku, Białogardzie i Bardach
Percentage share of land cover and land use classes in the differential catchment areas as far as the hydrometric stations in Tychówko, Białogard, and Bardy

Klasa pokrycia terenu i użytkowania ziemi na podstawie Corine Land Cover <i>Land cover and land use class based on Corine Land Cover</i>	Klasa SWAT <i>SWAT class</i>	Udział w powierzchni zlewni <i>Share in the catchment area</i> (%)		
		wodowskaz Tychówko <i>Tychówko water gauge</i> (899 km ²)	wodowskaz Białogard <i>Białogard water gauge</i> (1224 km ²)	wodowskaz Bardy <i>Bardy water gauge</i> (2866 km ²)
1 – zabudowa luźna	Residential Med/ Low Density	0,82	1,04	1,03
2 – strefy przemysłowe lub handlowe	Commercial	0,09	0,11	0,06
3 – lotniska	Transportation	–	–	0,14
4 – miejsca eksploatacji odkrywkowej	Industrial	0,03	0,02	0,03
5 – tereny sportowe i wypoczynkowe	Residential Low Density	0,03	0,03	0,05
6 – grunty orne	Agricultural Land-Generic	39,52	41,25	40,63
7 – sady i plantacje	Orchard	0,15	0,11	0,13
8 – łąki	Grassland	6,25	6,38	7,28
9 – złożone systemy upraw i działek	Cropland/Grassland mosaic	0,99	0,95	1,06
10 – tereny głównie zajęte przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej	Cropland/ Woodland mosaic	8,88	7,39	5,55
11 – lasy liściaste	Deciduous Broadleaf Forest	9,90	9,71	8,14
12 – lasy iglaste	Evergreen Needleleaf Forest	20,77	22,67	23,53
13 – lasy mieszane	Mixed Forest	10,73	8,89	10,96
14 – lasy w stanie zmian	Shrubland	1,10	0,87	0,79
15 – bagna śródładowe i torfowiska	Herbaceous Wetland	0,17	0,17	0,12
16 – zbiorniki wodne	Water Bodies	0,54	0,40	0,50

Warunki hydrologiczne

Parsęta reprezentuje typ zasilania gruntowo-deszczowo-śnieżny, z okresami wezbraniowymi wiosną (Dynowska, 1971). A. Choiński (1998) jako cechy charakterystyczne dorzecza Parsęty wskazuje małą zmienność odpływu w ciągu roku oraz wielolecia, a także wysokie wartości minimalnych odpływów jednostkowych, co zapobiega występowaniu głębokich niżówek. Cechą charakterystyczną jest duża stabilność i bezwładność hydrologiczna rzek, a także stabilny i wysoki udział odpływu podziemnego.

Na podstawie danych dobowych przepływów z trzech posterunków wodowskazowych IMGW – Bardy, Białogard oraz Tychówko przeprowadzono analizę przepływów w latach hydrologicznych 1966-2010 (tab. 5). Posługując się danymi z posterunku hydrometrycznego Bardy, zamykającego badane dorzecze średni roczny przepływ ($SSQ_{1966-2010}$) Parsęty wyliczono na $27,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Wartość minimalna przepływu ($NNQ_{1966-2010}$) wyniosła $10,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, natomiast maksymalna ($WWQ_{1966-2010}$) $140,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. O dużym wyrównaniu średnich rocznych przepływów świadczy współczynnik zmienności (C_v) – 0,15 dla posterunku Bardy. Dla posterunków wodowskazowych w środkowym biegu, tj. Białogard i Tychówko średni przepływ ($SSQ_{1966-2010}$) Parsęty wynosi odpowiednio $11,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i $8,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabela 5. Przepływy charakterystyczne główne II stopnia ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) oraz średni odpływ jednostkowy ($\text{dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) Parsęty dla posterunków hydrometrycznych w Tychówku, Białogardzie i Bardach

Characteristic main 2nd-order discharges ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) and mean specific runoff ($\text{dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) of the River Parsęta river at the hydrometric stations in Tychówko, Białogard and Bardy

Charakterystyka / Characteristic		Wodowskaz / Water gauge		
		Tychówko	Białogard	Bardy
Średni odpływ jednostkowy	Sq	9,34	8,99	9,69
Przepływy minimalne	NNQ	2,60	3,80	10,20
	SNQ	4,00	5,40	14,40
	WNQ	5,40	7,20	20,70
Przepływy średnie	NSQ	5,70	7,70	20,20
	SSQ	8,40	11,00	27,80
	WSQ	11,90	16,40	42,70
Przepływy maksymalne	NWQ	15,20	18,60	42,00
	SWQ	34,00	40,40	80,10
	WWQ	67,00	63,40	140,00

Źródło: dane IMGW, obliczenia własne. / Source: IMGW data, authors' own calculations.

Wyniki symulacji obiegu wody

Symulacje obiegu wody w zlewni Parsęty przeprowadzono dla okresu 1966-2010, przy czym lata 1966-1968 przeznaczono na okres dostosowywania modelu (ang. *warm-up period*), 1969-1995 – na kalibrację, a 1996-2010 – na walidację modelu. We wstępnym etapie oceny wyników przeanalizowano wartości składowych bilansu wodnego w tych okresach dla całego dorzecza. Na tym etapie wyniki dotyczące odpływu całkowitego oceniono poprzez porównanie symulowanych przez model SWAT średnich rocznych wysokości odpływu w całym okresie kalibracji i walidacji z wartościami obliczonymi na podstawie danych pomiarowych z posterunku hydrometrycznego IMGW w Bardach, który jest profilem zamykającym zlewnię. Obliczone na podstawie danych pomiarowych średnie roczne wysokości odpływu wyniosły dla okresu kalibracji 316 mm, a dla okresu walidacji 309 mm. Według wartości symulowanych przez model hydrologiczny jest to dla okresu kalibracji 307 mm, dla okresu walidacji 297 mm. Model zaniża zatem wartości odpływu, jednak na poziomie tylko 3-4%, zachowując proporcje pomiędzy dwoma rozpatrywanymi okresami.

Analiza przestrzenna odpływu wody

Aby określić zróżnicowanie przestrzenne odpływu w dorzeczu Parsęty, opracowano mapę rozkładu przestrzennego średnich wartości rocznych w układzie 810 zlewni cząstkowych (ryc. 5). Analizując rozkład przestrzenny symulowanych średnich rocznych wysokości odpływu ze zlewni cząstkowych stwierdzono najniższe wartości w południowo-wschodniej i północno-zachodniej części obszaru badań, najwyższe zaś – w środkowej. Obraz ten częściowo koresponduje z rozkładem średnich rocznych wysokości opadu (ryc. 5), który z kolei jest wynikiem przyjętego w modelu SWAT sposobu interpolacji danych opadowych. Uzyskany układ symulowanych średnich rocznych wysokości odpływu wskazuje na zróżnicowanie przestrzenne stylów funkcjonowania całej zlewni, jej zasilania, organizacji i udziału poszczególnych zlewni cząstkowych w kształtowaniu odpływu wody. Nie zaobserwowano bezpośredniego wpływu morfologii terenu na kształtowanie

Ryc. 5. Przestrzenny rozkład zmiennych wyjściowych modelu SWAT

I – średnie roczne wysokości odpływu wody (mm) w okresie 1996-2010 w zlewniach cząstkowych dorzecza Parsęty do profilu hydrometrycznego w Bardach – zmienna WYLD

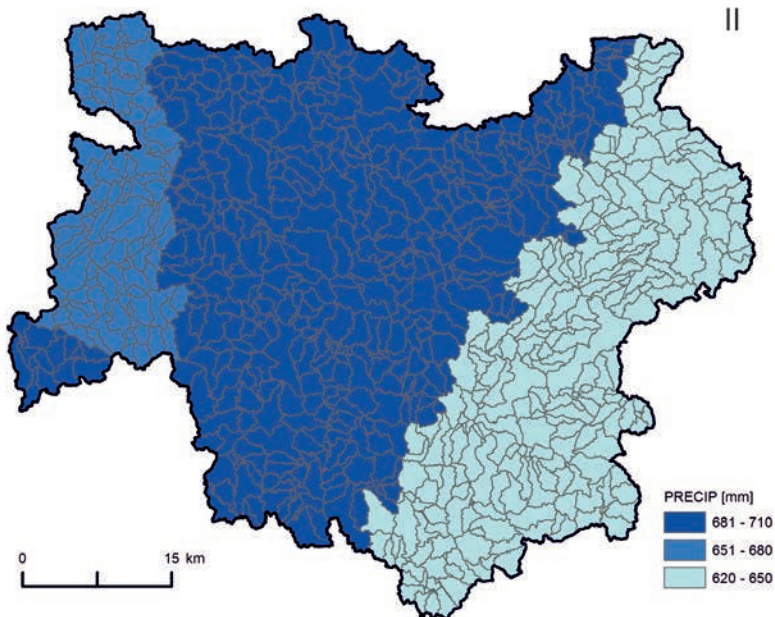
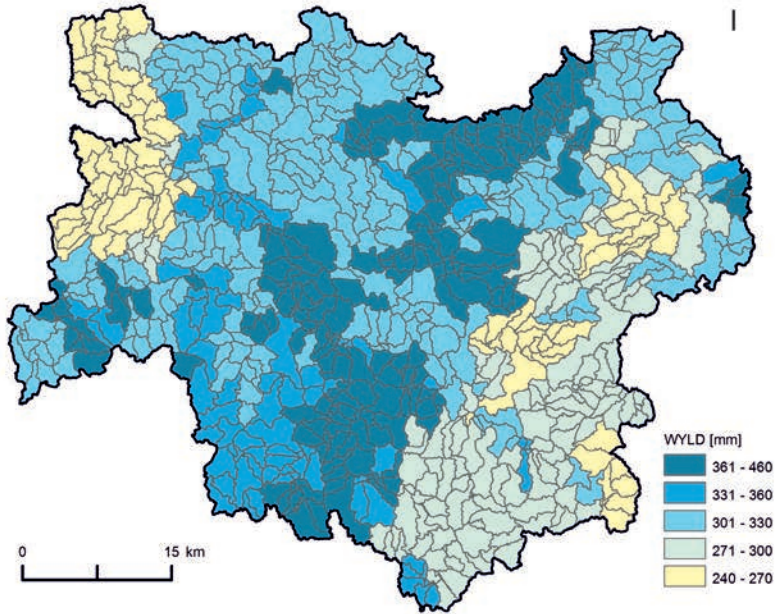
II – średnie roczne wysokości opadu (mm) w okresie 1996-2010 w zlewniach cząstkowych dorzecza Parsęty do profilu hydrometrycznego w Bardach – zmienna PRECIP

Spatial distribution of SWAT-model output variables

I – mean annual height of runoff (mm) in 1996-2010 in subcatchments of the Parsęta drainage basin as far as the hydrometric profile in Bardy – WYLD variable

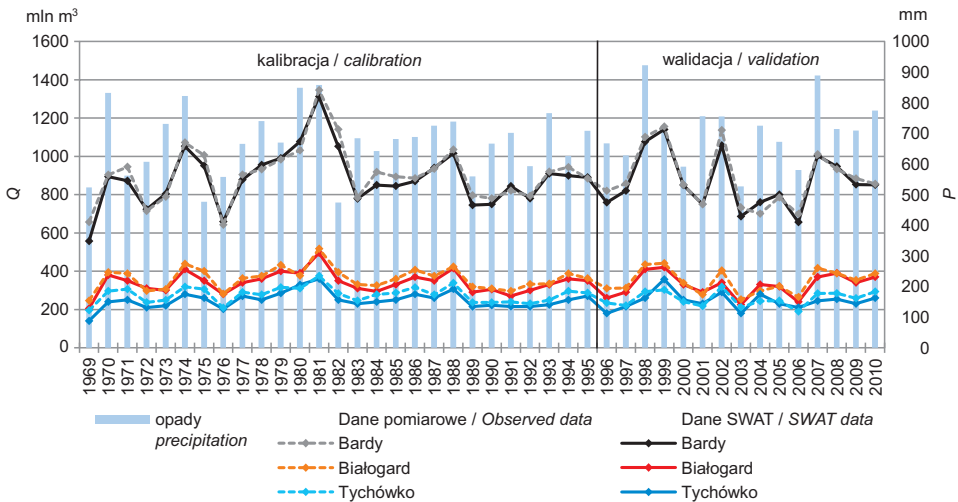
II – mean annual precipitation (mm) in 1996-2010 in the subcatchments of the Parsęta drainage basin as far as the hydrometric profile in Bardy – PRECIP variable

wielkości odpływu wody z dorzecza, poza najwyższymi odpływami, które generowane są na obszarach o dużych wysokościach względnych, głównie we wschodniej części dorzecza. Warto podkreślić, że najniższe odpływy wody nawiązują do obszarów o leśnym typie pokrycia terenu, które mają duże zdolności retencyjne.



Analiza czasowa odpływu wody

Kolejnym etapem analizy wyników symulacji była weryfikacja serii czasowych odpływu wody. Ocenie poddano wyniki dotyczące odpływu wody z rocznym krokiem czasowym w okresie kalibracji (1969-1995) oraz walidacji (1996-2010) modelu (ryc. 6). Obliczone statystyki na podstawie porównania serii danych symulowanych oraz obserwowanych dla trzech profili wodowskazowych zebrano w tabeli 6. Otrzymane wartości statystyk według kryterium oceny modelu hydrologicznego ze względu na współczynnik determinacji (Sarma i inni, 1973) klasyfikują wyniki średnich rocznych odpływu wody ogólnie jako bardzo dobre. Ocena ta odnosi się do okresu zarówno kalibracji, jak i walidacji modelu. W porównaniu poszczególnych miar statystycznych nieco niższe oceny wskazywane są wg współczynnika efektywności modelu Nasha-Sutcliffea (NSE). Wartości odchylenia procentowego PBIAS mieszczą się w zakresie 3-13% dla okresu kalibracji oraz 4-17% dla okresu walidacji. Wyniki te należy również uznać za bardzo dobre i dobre wedle kryteriów oceny modelu hydrologicznego J. Singha i innych (2004). Jednocześnie należy zauważyć, że są to wartości dodatnie, zatem we wszystkich projektach wielkość odpływu wody była nieznacznie zaniżona. Porównując wyniki w zależności od podziału na okresy kalibracji oraz walidacji stwierdzono bardzo małe różnice współczynników oceny, co świadczy o poprawnym określeniu ram czasowych tych okresów, właściwym doborze wartości parametrów podczas procedury kalibracji oraz stabilności przyjętych struktur modelu SWAT.



Ryc. 6. Porównanie symulowanych wartości rocznego odpływu wody dla posterunków hydrometrycznych w Tychówku, Białogardzie i Bardach na tle rocznej sumy opadów atmosferycznych

Comparison of measured and simulated values for annual runoff at the water gauges in Tychówko, Białogard and Bardy, against the background of annual precipitation totals

Tabela 6. Statystyki oceny symulowanych rocznych wartości odpływu wody dla posterunków hydrometrycznych w Tychówku, Białogardzie i Bardach
 Statistics to the evaluation of simulated annual runoff at the water gauges in Tychówko, Białogard and Bardy

Wodowskaz <i>Water gauge</i>	Okres kalibracji / <i>Calibration period</i> (1969-1995)			Okres walidacji / <i>Validation period</i> (1996-2010)		
	R^2	NSE	PBIAS	R^2	NSE	PBIAS
Tychówko	0,69	0,61	12,50	0,64	0,60	16,64
Białogard	0,78	0,72	7,98	0,75	0,70	5,30
Bardy	0,83	0,77	3,15	0,82	0,76	3,97

Dyskusja

Porównując wartości uzyskanych serii danych symulowanych w poszczególnych latach należy wskazać, że duże różnice w stosunku do danych pomiarowych IMGW wystąpiły dla lat suchych (lata 1971, 1975, 1982, 1989, 2003), czyli w okresach następujących po latach bardzo wilgotnych i wilgotnych (ryc. 6). Obserwowane były wówczas mocno zaniżone wartości odpływu wody. Reakcja zlewni na mniejszą wysokość opadów według modelu SWAT była zatem szybsza, niż według danych pomiarowych.

Analizując uzyskane wartości współczynników statystycznych pomiędzy poszczególnymi profilami hydrometrycznymi można zauważyć, że najbardziej zgodne z danymi obserwowanymi IMGW były wyniki modelowania otrzymane dla profilu zamykającego dorzecze w Bardach, natomiast im mniejszy obszar zasilania, tym uzyskiwane współczynniki statystyczne oceny wyników były niższe. Na obserwowaną zależność między powierzchnią zlewni a oceną modelu przy zastosowaniu statystyki R^2 oraz NSE wskazują także M. Piniewski i T. Okruszko (2011) oraz M. Piniewski i inni (2015). Na niższe wartości współczynników oceny w analizowanych zlewniach cząstkowych może wpływać reprezentacja poszczególnych klas spadków (tab. 2) oraz typów gleb (tab. 3). Zlewnię cząstkową do profilu w Tychówku charakteryzuje największy udział obszarów średnio i silnie nachylonych, a także największy udział gleb o małej przepuszczalności. Zlewnia do profilu w Białogardzie cechuje się zbliżonym udziałem klas rozpatrywanych elementów w porównaniu do całego dorzecza (tab. 2, tab. 3).

Wnioski

W procesie każdego modelowania dąży się do równowagi pomiędzy kompletnością i szczegółowością modelu a jego użytecznością. Systemy informacji geograficznej umożliwiają szczegółową analizę wpływu poszczególnych danych wejściowych na ostateczne wyniki modelowania i wybór optymalnej struktury modelu dla analizowanych warunków fizycznogeograficznych zlewni. Zastosowane w badaniach przestrzenne dane wejściowe okazały się odpowiednie pod względem rozdzielczości przestrzennej i informacyjnej do uzyskania bardzo dobrego i dobrego dopasowania wartości symulowanych pochodzących z modelu SWAT z rzeczywistymi wartościami odpływu wody obserwowanymi w sieci pomiarowej IMGW w obszarze dorzecza Parsęty. Istotny był także wybór metod obliczeniowych na etapie symulacji w modelu SWAT oraz kalibracji wyników w oprogramowaniu SWAT-CUP.

Najbardziej zgodne z danymi obserwowanymi były wyniki symulacji odpływu wody w profilu zamykającym dorzecze, natomiast im mniejszy obszar zasilania, tym niższe były współczynniki statystyczne oceny wyników, co jest związane zarówno z warunkami fizycznogeograficznymi zlewni różnicowych, jak i z procedurą kalibracji.

Zastosowanie modelu SWAT na rzece nizinnej obszaru młodoglacjalnego potwierdziło jego uniwersalne możliwości stosowania w odniesieniu do zlewni o zróżnicowanych warunkach środowiskowych i reżimie rzeczny. Przyjęta metodyka analityczna może być stosowana w badaniach nie tylko odpływu wody, ale również odpływu osadów i roztworów transportowanych w korytach rzecznych na obszarze młodoglacjalnym.

*

Praca współfinansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy nr NN 306 0409 36.

Piśmiennictwo / References

- Abbaspour K.C., Johnson A., van Genuchten M.Th., 2004, *Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure*, Vadose Zone Journal, 3, 4, s. 1340-1352.
- Abbaspour K.C., 2012, *SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual*, Eawag.
- Aksoy H., Kavvas M.L., 2005, *A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models*, Catena, 64, s. 247-271.
- 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, s. 73-89.

- Berezowski T., Szcześniak M., Kardel I., Michałowski R., Okruszko T., Mezghani A., Piniewski M., 2016, *CPLFD-GDPT5: High-resolution gridded daily precipitation and temperature data set for two largest Polish river basins*, Earth System Science Data, 8, s. 127-139.
- Beven K., 2001, *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*, John Wiley and Sons, Chichester.
- Bogdanowicz R., Olszewska A., Drwal J., Woźniak E., 2010, *Zastosowanie Systemów Informatyki Geograficznej (GIS) do oceny hydrograficznych uwarunkowań wielkości dostawy zanieczyszczeń w zlewniach młodoglacjalnych na przykładzie zlewni Borucinki*, [w:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce, s. 91-97.
- Brzozowski J., Miatkowski Z., Śliwiński D., Smarzyńska K., Śmietanka M., 2011, *Application of SWAT model to small agricultural catchment in Poland*, Journal of Water and Land Development, 15, s. 157-166.
- Choiński A., 1998, *Warunki obiegu wody w dorzeczu Parsęty*, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geokosystemów zlewni rzecznych. Środowisko przyrodnicze dorzecza Parsęty – stan badań, zagospodarowanie, ochrona*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, s. 36-51.
- Crawford N.H., Linsley R.K., 1966, *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*, Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- Daniel E.B., Camp J.V., LeBoeuf E.J., Penrod J.R., Dobbins J.P. Abkowitz M.D., 2011, *Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review*, The Open Hydrology Journal, 5, s. 26-50.
- Dynowska I., 1971, *Typy reżimów rzecznych w Polsce*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 28.
- Fac-Beneda J., 2011, *Młodoglacjalny system hydrograficzny*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- 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 American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50, 4, s. 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, s. 1-8.
- Geethalakshmi V., Kitterød N.O., Lakshmanan A., 2008, *A literature review on modeling of hydrological processes and feedback mechanisms on climate*, CLIMARICE Report No. 2, The Norwegian Institute for Agriculture and Environmental Research (Bioforsk), Norway.
- Green W.H., Ampt G.A., 1911, *Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils*, Journal of Agricultural Science, 4, s. 1-24.
- Gutry-Korycka M., 1999, *Zlewnia jako geokosystem dynamiczny*, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geokosystemów zlewni rzecznych. Powodzie rzek Przymorza Bałtyku i innych regionów Polski – uwarunkowania, przebieg, skutki w środowisku przyrodniczym*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, s. 17-32.
- Hargreaves G.L., Hargreaves G.H., Riley J.P., 1985, *Agricultural benefits for Senegal River basin*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108, 3, s. 225-230.
- Ignar S., 1988, *Metoda SCS i jej zastosowanie do wyznaczania opadu efektywnego*, Przegląd Geofizyczny, 33, 4, s. 451-455.
- Jenks G.F., 1967, *The data model concept in statistical mapping*, International Yearbook of Cartography, 7, s. 186-190.

- Karczewski A., 1998, *Układ przestrzenny stref morfologicznych dorzecza Parsęty*, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych. Środowisko przyrodnicze dorzecza Parsęty – stan badań, zagospodarowanie, ochrona*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, s. 15-20.
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kostrzewski A., 1998, *Struktura krajobrazowa dorzecza Parsęty w oparciu o dotychczasowe podziały fizyczno-geograficzne*, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych. Środowisko przyrodnicze dorzecza Parsęty – stan badań, zagospodarowanie, ochrona*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, s. 131-141.
- Kostrzewski A., 2003, *Obieg wody i jego wpływ na powstanie i funkcjonowanie struktur krajobrazowych*, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych. Obieg wody – uwarunkowania i skutki w środowisku przyrodniczym*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, s. 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.
- Krysanova V., White M., 2015, *Advances in water resources assessment with SWAT – an overview*, Hydrological Sciences Journal, doi: 10.1080/02626667.2015.1029482.
- Monteith J.L., 1965, *Evaporation and the environment & in the state and movement of water in living organisms*, [w:] *Proceedings of the Society of Experimental Biology, Symposium No 19, Swansea, U.K.*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 205-234.
- Moriasi D.N., Wilson B.N., Douglas-Mankin K.R., Arnold J.G., Gowda P.H., 2012, *Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation*, Transactions of the ASABE, 55, 4, s. 1241-1247.
- MPHP [Mapa Podziału Hydrograficznego Polski], 2010, *Rastrowa Mapa Podziału Hydrograficznego Polski*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej; <http://www.kzgw.gov.pl/pl/rastrowa-mapa-podzialu-hydrograficznego-polski.html> (10.03.2016).
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2011, *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009*, Temple, Texas: USDA ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Newham L.T.H., Letcher R.A., Jakeman A.J., Kobayashi T., 2004, *A framework for integrated hydrologic, sediment and nutrient export modelling for catchment-scale management*, Environmental Modelling & Software, 19, s. 1029-1038.
- O'Callaghan J.F., Mark D.M., 1984, *The extraction of drainage networks from digital elevation data*, Computer Vision Graphics and Image Processing, 28, s. 323-344.
- Pechlivanidis I.G., Jackson B.M., McIntyre N.R., Wheeler H.S., 2011, *Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications*, Global NEST Journal, 13, 3, s. 193-214.
- Piniewski M., 2012, *Impacts of Natural and Anthropogenic Conditions on the Hydrological Regime of Rivers: A Narew River Basin Case Study*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Piniewski M., Marcinkowski P., Kardel I., Giełczewski M., Izydorczyk K., Frątczak W., 2015, *Spatial quantification of non-point source pollution in a meso-scale catchment for an assessment of buffer zones efficiency*, Water, 7, s. 1889-1920.
- Piniewski M., Okruszko T., 2011, *Multi-site calibration and validation of the hydrological component of SWAT in a large lowland catchment*, [w:] D. Świątek, T. Okruszko (red.), *Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment*, Geoplanet: Earth and Planetary Sciences, Springer, Berlin, Germany, s. 15-41.

- Priestly C.H.B., Taylor R.J., 1972, *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*, Monthly Weather Review, 100, 2, s. 81-92.
- 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.
- 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, s. 329-347.
- Singh J., Knapp H.V., Demissie M., 2004, *Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT*, Journal of American Water Resources Association, 41, s. 343-360.
- Surfleet C.G., Tullos D., Chang H., Jung I.W., 2012, *Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures*, Journal of Hydrology, 464-465, s. 233-248.
- USDA Soil Conservation Service, 1972, *Section 4. Hydrology*, [w:] *National Engineering Handbook*, US. Department of Agriculture-Soil Conservation Service, Washington.
- Walczykiewicz T. (red.), 2010, *Zrównoważone gospodarowanie wodą, zasobami geologicznymi i leśnymi kraju*, [w:] *KLIMAT – Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo (zmiany, skutki i sposoby ich ograniczania, wnioski dla nauki, praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego)*; <http://klimat.imgw.pl/> (12.03.2016).
- Winchell M., Srinivasan R., Di Luzio M., Arnold J., 2011, *ArcSWAT Interface for SWAT2009. User's Guide*, Blackland Research and Extension Center Texas Agrilife Research, s. 464.
- Zwołański Z., 1986, *Kooperacja przepływowa jako miernik zmian reżimu rzecznoego*, [w:] *Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Hydrograficznej, Hydrologia regionalna i procesy hydrologiczne w zlewniach*, Poznań, s. 221-225.
- Zwołański Z., 1989, *Geomorficzne dostosowywanie się koryta Parsęty do aktualnego reżimu rzecznoego*, Dokumentacja Geograficzna, 3-4, IGiPZ PAN.

[Wpłynęło: lipiec; poprawiono: listopad 2016 r.]

JOANNA GUDOWICZ, ZBIGNIEW ZWOLIŃSKI

SHAPING OF RIVER OUTFLOW IN THE PARSEŃTA BASIN IN THE LIGHT OF HYDROLOGICAL MODELLING

The aim of the work described here was to assess the temporal variability and spatial differentiation characterising the outflow of a river, using integrated geoinformation methods and hydrological modelling. The study was conducted in the Parsęta drainage basin, whose internal structure is considered representative of young-glacial lowlands in the temperate climatic zone. The simulations of water balance were carried out using a hydrological and water quality model called the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), as integrated into a geographical information system. SWAT is a basin-scale, continuous-time model. It was designed to predict the impact of watershed management changes on outflows of water, sediment and chemical components. The spatial data analysis is based on concerns a digital elevation model, lithology, hydrography, soil, land cover and land use. The simulations included meteorological data for the period 1966-2010 from 4 meteorological stations of the Institute of Meteorology and Water

Management. Selected from among available methods were: the Soil Conservation Service Curve Number method (SCS-CN) to estimate surface runoff, the Penman-Monteith method to estimate potential evapotranspiration, and the Muskingum river routing method for a channel network. Models required calibration, which was achieved using SWAT-CUP4 software. Within the SWAT-CUP4 framework, the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) calibration procedure was selected. Calibration and validation were performed on data collected at three water-gauge stations in Tychówko, Białogard and Bardy, for the years 1966-2010 (these measurement data were obtained from the Institute of Meteorology and Water Management). The results were assessed by reference to such statistics as the R^2 determination coefficient, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and percentage bias coefficient (PBIAS). The results with an annual time step were characterised by high values for the statistical evaluation coefficients. The values for the percentage bias coefficient were in the 3-13% range for the calibration, and of 4-17% in the case of the validation period. Found to be most consistent with the observed data were modelling results obtained for the closing profile of the basin. A reduction in the area of catchment considered was associated with lower values being obtained for the statistical coefficients, in respect of the evaluation of the results. In comparing results in relation to the period of calibration and validation, only very small differences as regards assessment factors were to be found. Application of the SWAT model in the case of a lowland river flowing through a young-glacial landscape confirmed that model's universal applicability to catchments characterised by widely different environmental conditions and river regimes.

