

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 55, 2012: 3–17
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 55, 2012)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 55, 2012: 3–17
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 55, 2012)

**Jarosław CHORMAŃSKI, Ignacy KARDEL,
Dorota MIROSLAW-ŚWIĄTEK, Tomasz OKRUSZKO**

Katedra Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie
Department of Hydraulic Engineering WULS – SGGW

Dorota PUSŁOWSKA-TYSZEWSKA

Katedra Gospodarki Wodnej, Politechnika Warszawska
Department of Water Resources, Technical University of Warsaw

Model zlewni o parametrach przestrzennych dyskretnie rozłożonych w obszarze zurbanizowanym **Semi-distributed model of basin in urban area**

Słowa kluczowe: ArcGIS, model matematyczny zlewni o parametrach przestrzennych dyskretnie rozłożonych, hydrologia obszarów zurbanizowanych

Key words: ArcGIS, semi-distributed mathematical basin model, urban hydrology

Wstęp

Urbanizacja jest przyczyną wielu zmian środowiskowych przybierających obecnie charakter zmian globalnych (Gutry-Korycka 2005). Jednym z najistotniejszych oddziaływań urbanizacji na obieg wody jest zwiększenie powierzchni nieprzepuszczalnych (uszczelnionych), takich jak: parkingi, drogi utwardzone (asfaltowe, betonowe, szutrowe i in.) i dachy domów, które uniemożliwiają infiltrację deszczu do

gleby i powodują jej szybki odpływ do kanalizacji burzowej. Wzrost powierzchni uszczelnionych prowadzi do skrócenia czasu koncentracji przepływu i zwiększenia jego kulminacji oraz objętości fali wezbraniowej w zlewni (Geiger i Dreiseitl 1999), powodując wzrost zagrożenia powodziowego, jak również zwiększa ryzyko zanieczyszczenia wody (Peters 2009).

Związek zmian hydrograficznych ze zwiększeniem udziału w zlewni obszarów szczelnie pokrytych materiałami nieprzepuszczalnymi badali Tourbier i Westmacott (1981). Zwiększenie uszczelnienia terenu do 30–50% powoduje według tych autorów trzykrotny wzrost odpływu powierzchniowego, a uszczelnienia w granicach 75–100% – nawet pięciokrotny. Mapy topograficzne pokrycia

terenu umożliwiają rozróżnianie rodzajów zabudowy miejskiej i przemysłowej (np. bloki mieszkalne, domy jednorodzinne, centra handlowe, drogi o różnej nawierzchni, parki, cmentarze), którym w praktyce mogą być przypisywane średnie wartości szczelności powierzchni. Podejście takie, polegające na częściowym rozłożeniu parametrów modelowania, jest bardzo praktyczne i pozwala na wykorzystanie ogólnie dostępnych danych cyfrowych o pokryciu terenu (np. Corine Land Cover). W praktyce inżynierskiej stosuje się często jeszcze prostsze rozwiązania.

Najprostszą metodą stosowaną do określenia maksymalnej wielkości wezbrania w małych zlewniach zurbanizowanych jest formuła racjonalna stosowana w projektowaniu sieci kanalizacyjnej, uwzględniająca informacje o stopniu szczelności zlewni w funkcji współczynnika odpływu (Mulvany 1851, Pilgrim i Cordery 1992). Bardziej zaawansowanym podejściem jest stosowanie metody hydrogramu jednostkowego, chwilowego hydrogramu jednostkowego (np. według Lutza, za Gutry-Korycką 2003) lub metody izochron, bazującej na metodzie Kirpicha (Oksiuta 2007, Oksiuta i Gutry-Korycka 2008). Zastosowanie modeli hydrologicznych o parametrach skupionych, takich jak model Nasha (kaskady zbiorników liniowych) – do transformacji opadu efektywnego w odpływ bezpośredni, w połączeniu z modelem SCS-CN – do wyznaczenia opadu efektywnego, proponują Banasik i inni (2007, 2008, 2009). Modele o parametrach skupionych pozwalają na uwzględnienie średniej ważonej wartości para-

metrów dla całej zlewni. Alternatywnym podejściem jest stosowanie modeli o parametrach częściowo (dyskretnie) rozłożonych, które pozwalają na zróżnicowanie przepuszczalności podłoża dla homogenicznych klas użytkowania terenu, co jest następnie uwzględniane w parametrze CN, obliczanym w zlewniach elementarnych. Modelem tego typu, często wykorzystywanym dla zlewni miejskich, jest SWMM – Storm Water Management Model (Barszcz 2009a, b), umożliwiający dodatkowo prowadzenie hydrodynamicznych analiz ilościowych działania sieci kanalizacji deszczowej (Larm 2000, Chen i Adams 2007, Park i in. 2009, Skotnicki i Sowiński 2009). W ochronie przeciwpowodziowej wykorzystuje się różnej kategorii modele hydrodynamiczne. W takim przypadku modelowana jest nie tylko ilość odpływającej wody, ale również zasięg i głębokość zalewu powierzchniowego oraz czas jego trwania (Gutry-Korycka 2007).

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie modelu hydrologicznego WetSpa (Liu i in. 2002), w wersji o parametrach dyskretnie rozłożonych, do obliczania hydrogramu odpływu w warunkach zlewni zurbanizowanej. Model w tej wersji był już wykorzystywany do badania w zlewniach zurbanizowanych struktury odpływu ze zlewni, w której obszary zurbanizowane stanowiły około 20% (Liu i in. 2004, 2006). Celem tego artykułu jest opracowanie modelu dla zlewni zurbanizowanej w 50%, co wymagało dokonania zmian w dotychczasowej strukturze modelu.

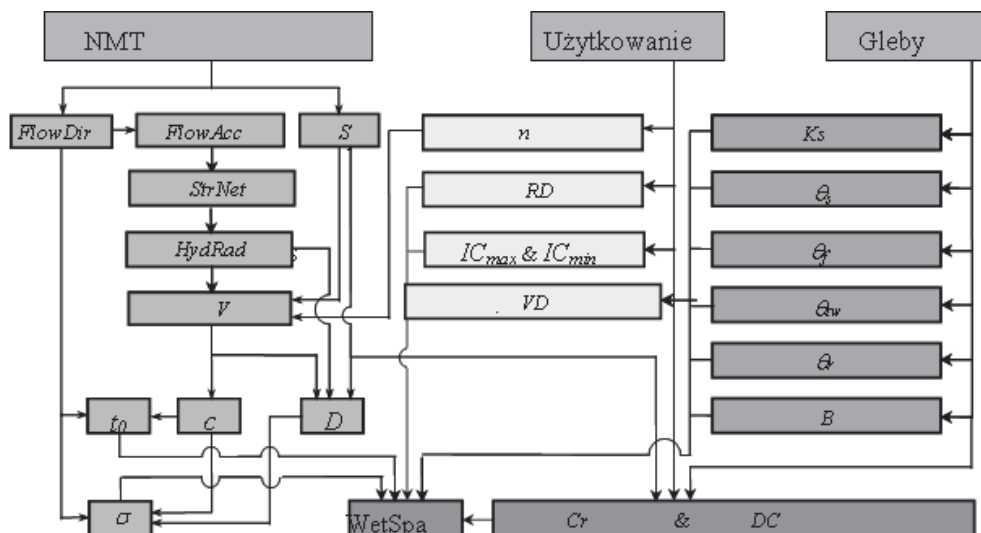
Badania sfinansowano ze środków grantu MNiSW nr 637/N-Rosja/09/2010.

Funkcjonowanie modelu Wetspa

Model hydrologiczny WetSpa (Water and Energy Transfer between Soil, Plant and Atmosphere) został skonstruowany w pierwszej wersji jako model bilansowy (Batelaan i in. 1996, Wang i in. 1996), a obecnie jest dynamicznym modelem do obliczania odpływu ze zlewni (De Smedt i in. 2000). Składa się z dwóch modułów: modułu GIS, wspomagającego określanie przestrzennego rozkładu parametrów lokalnych i map wynikowych, oraz modułu hydrologicznego. Obecnie funkcjonują dwie wersje modułu GIS dostosowane do modelu WetSpa: WetSpa 2.1 (Liu 2004) – interfejs w programie ArcView GIS 3.x, oraz WetSpa-SGGW – nowoczesny interfejs, będący modułem programu ArcGIS 10 (Chormański i Michałowski 2011). Moduł hydrologiczny wyposażony jest

w dwie metody obliczeniowe, różniące się sposobem uwzględnienia rozkładu przestrzennego parametrów – model o parametrach rozłożonych i model o parametrach dyskretnie rozłożonych. Model ten stosowany był w Polsce do symulacji odpływu ze zlewni rolniczych (Poretta-Brandyk i in. 2010, 2011, Chormański i Batelaan 2011).

W modelu WetSpa obliczenia hydrologiczne wykonywane są w siatce rastrowych pól podstawowych (GRID). Dla każdego węzła siatki na podstawie map rastrowych o wybranej przez użytkownika rozdzielczości (numerycznego modelu terenu – NMT, użytkowania gruntów i mapy gatunków glebowych) przypisywane są parametry przestrzenne uzależnione od rodzaju gleby, użytkowania i ukształtowania terenu (rys. 1), które następnie w wersji o parametrach częściowo rozłożonych są agregowane



RYSUNEK 1. Schemat obliczeń rozkładu przestrzennego parametrów fizycznych zlewni na podstawie map cyfrowych (Liu 2004, zmienione)

FIGURE 1. The calculation scheme of spatial distribution of basin physical parameters based on digital maps (Liu 2004, adopted)

w zlewniach elementarnych. Liczba (lub wielkość) zlewni elementarnych jest wyznaczana w procesie analizy NMT i kontrolowana przez użytkownika.

Każda komórka rastrowa/siatki modelu traktowana jest jako cztery poziome warstwy (strefy): roślinności, korzeni, napowietrzenia gleby (aeracji) i saturacji warstwy wodonośnej. Procesy hydrologiczne zachodzące w każdej z nich podlegają symulacji w kolejności analogicznej do procesów zachodzących od wystąpienia opadów – intercepcji szaty roślinnej, infiltracji, retencji powierzchniowej (depresyjnej), odpływu powierzchniowego, odpływu podpowierzchniowego, perkolacji i dopływu wód gruntowych. Na podstawie mapy użytkownika zlewni obliczane są parametry roślinności: maksymalna (IC_{max}) i minimalna (IC_{min}) pojemność retencji intercepcji, VD – gęstość pokrywy roślinnej, RD – głębokość korzeni, oraz n – współczynnik szorstkości Manninga. W strefie aeracji i saturacji, na podstawie cech teksturalnych gleb przyporządkowanych według ich gatunków, określane są parametry przewodności hydraulicznej i krzywych retencji wodnej gleb: Ks – przewodność hydrauliczna, θ_s – porowatość ogólna, θ_f – pojemność polowa, θ_{wv} – punkt trwałego wędnięcia roślin, θ_r – wilgotność resztowa, B – współczynnik będący miarą wielkości porów.

NMT wykorzystywany jest do obliczenia parametrów odpływu na podstawie map: S – spadków, FlowDir – kierunków bezpośredniego odpływu, FlowAcc – akumulacji odpływu, StrNet – modelowej sieci cieków, HydRad – promienia hydraulicznego cieków, oraz V – średniej prędkości odpływu, w której wykorzystywany jest parametr szorst-

kości podłoża w postaci mapy współczynnika Manninga. Na podstawie mapy FlowAcc i otrzymanej na jej podstawie StrNet wyznaczone są zlewnie elementarne według zadanej przez użytkownika powierzchni zlewni. W następnym kroku na ich podstawie wyznaczane są parametry hydrogramu jednostkowego: t_0 – średni czas dopływu od komórki rastrowej do profilu zamykającego, oraz σ – odchylenie standardowe czasu dopływu – równania (4) i (5), które są numerycznym uproszczeniem parametrów fali dyfuzyjnej (c , D). Wszystkie trzy mapy podstawowe wykorzystywane są do obliczania map retencji depresyjnej w rastrze elementarnym (DC) oraz mapy współczynnika odpływu (Cr) – Liu (2004). Na podstawie map parametrów w każdej z czterech wyróżnionych warstw komórek siatki modelu obliczany jest dynamiczny bilans wodny. Procesy hydrologiczne modelowane są przez zastosowanie fizycznych i empirycznych zależności. Podstawowym czynnikiem odpowiedzialnym za kształtowanie się odpływu powierzchniowego i podpowierzchniowego jest wilgotność gleby w strefie korzeniowej. Określenie tej wilgotności dla każdej komórki zlewni odbywa się na podstawie zaprezentowanego poniżej równania bilansu wodnego dla powierzchniowej warstwy gleb:

$$D \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = P - I - S - E - F - R \quad (1)$$

gdzie:

D – głębokość strefy korzeniowej,
 $\Delta\theta$ – zmiana wilgotności glebowej,
 Δt – krok czasowy,
 P – opad atmosferyczny,
 I – straty początkowe uwzględniające intercepcję i retencję depresyjną,

S – odpływ powierzchniowy,
 E – ewapotranspiracja rzeczywista,
 F – odpływ podpowierzchniowy,
 R – perkolacja ze strefy korzeniowej.

Wielkość intercepcji obliczana jest według równania:

$$I_i = I_{i\min} + (I_{i\max} - I_{i\min}) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left(2\pi \frac{d-87}{365} \right) \right]^b \quad (2)$$

gdzie:

$I_{i\min}$ – intercepcja minimalna dla danej komórki [mm],

$I_{i\max}$ – intercepcja maksymalna dla danej komórki [mm],

d – dzień roku,

b – parametr uzależniony od warunków lokalnych.

Opad skuteczny (efektywny – S) obliczany jest z wykorzystaniem zmodyfikowanej formuły racjonalnej uzależnionej od stanu wilgoci glebowej i współczynnika odpływu:

$$S = C_r P_n (\theta / \theta_s) \quad (3)$$

gdzie:

S – opad skuteczny,

C_r – współczynnik odpływu zależny od wielkości spadku rzeźby terenu, rodzaju gleby i użytkowania zlewni,

P_n – wielkość opadu atmosferycznego po odjęciu strat wody zatrzymanej przez intercepcję szaty roślinnej,

θ – aktualna wilgotność gleby,

θ_s – maksymalna pojemność wodna gleby.

Tak obliczony opad skuteczny w stadium początkowym opadu wypełnia retencję depresyjną, a następnie odprowadzany jest jako spływ powierzchniowy. Odpływ powierzchniowy jest obliczany

z uproszczonego równania fali dyfuzyjnej. Numeryczna aproksymacja równania fali dyfuzyjnej (De Smedt i in. 2000) w postaci chwilowego hydrogramu jednostkowego (IUH) umożliwia określenie odpływu na końcu drogi odpływu jako funkcji średniego czasu dopływu z danej komórki rastrowej i odchylenia standardowego czasu dopływu do profilu kontrolnego:

$$U(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi t^3 / t_0^3}} \exp \left[\frac{-(t-t_0)^2}{2\sigma^2 t / t_0} \right] \quad (4)$$

$$Q(t) = \int \int_{A0}^t Q_0(\tau) U(t-\tau) d\tau dA \quad (5)$$

gdzie:

$u(t)$ – funkcja hydrogramu jednostkowego dla pojedynczej drogi odpływu [s^{-1}],

t_0 – średni czas dopływu [s],

σ – odchylenie standardowe czasu odpływu [s],

$Q(t)$ – hydrogram odpływu [$m^3 \cdot s^{-1}$],

Q_0 – opad efektywny [$m^3 \cdot s^{-1}$],

τ – opóźnienie czasowe [s],

t – czas [s],

A – powierzchnia zlewni [km^2].

Odpływ podpowierzchniowy dla każdej komórki szacowany jest z wykorzystaniem prawa Darcy'ego według równań:

$$F = C_e D S_0 K(\theta) / W \quad (6)$$

$$R = K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{(2+3B)/B} \quad (7)$$

gdzie:

F – odpływ podpowierzchniowy,

R – perkolacja ze strefy korzeniowej,

D – głębokość strefy korzeniowej,

C_e – parametr skalujący zależny od użytkowania terenu,

S_0 – spadek terenu,

$K(\Theta)$ – przewodność hydrauliczna w strefie nienasyconej,

K_s – przewodność hydrauliczna w strefie nasyconej,

Θ_r – resztkowa wilgotność glebowa,

W – wielkość komórki rastrowej,

B – indeks wielkości porów glebowych.

Obliczenia odpływu podziemnego w modelu WetSpa przeprowadzane są w całej zlewni z wykorzystaniem częściowo skupionego modelu, zakładającego nieliniowość między odpływem podziemnym i retencją wód podziemnych (Wittenberg i Sivapalan 1999):

$$Q_g = C_g S_g^2 \quad (8)$$

gdzie:

Q_g – odpływ podziemny ze zlewni cząstkowej,

C_g – współczynnik nieliniowej recesji zbiornika,

S_g – retencja wód podziemnych.

Odpływ całkowity ze zlewni jest obliczany w profilu zamykającym jako suma składowych odpływu powierzchniowego, podpowierzchniowego i podziemnego.

Ocena jakości działania modelu

Ocena jakości przeprowadzonych symulacji numerycznych dokonywana jest za pomocą pięciu statystycznych miar poprawności modelu: CR1, CR2, CR3, CR4 i CR5 (Liu 2004). Miara CR1 jest średnią różnicą między odpływem symulowanym a obserwowanym, odzwierciedlającą możliwość odtworzenia składników bilansu wodnego. Najlepszą

możliwą wartością CR1 jest wartość 0, która świadczy o znakomitym dopasowaniu wartości symulacji odpływu z wartościami obserwowanymi:

$$CR1 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{S_i} - Q_{O_i})}{\sum_{i=1}^N Q_{O_i}} \quad (9)$$

gdzie:

Q_{S_i} – wartości odpływu symulowanego,

Q_{O_i} – wartości odpływu obserwowanego.

Miara CR2 to współczynnik determinacji obliczany jako iloraz sum kwadratów odchylenia obserwowanego i obliczanego przepływu w stosunku do średniego zmierzonego przepływu. Wartość CR2 zbliżona do 1 wyraża wysoki stopień poprawności modelu:

$$CR2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{S_i} - \bar{Q}_O)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (10)$$

Miarę poprawności modelu CR3 określa współczynnik Nasha-Sutcliffe'a (1970), opisujący poprawność przebiegu symulowanego odpływu w sieci cieków. Wartości CR3 zmieniają się od ujemnych do 1, gdzie 1 jest wartością najlepszą:

$$CR3 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2 - \sum_{i=1}^N (Q_{O_i} - Q_{S_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (11)$$

CR4 oznacza logarytmiczną postać miary CR3, która określa skuteczność symulacji w zakresie niskich przepływów. Najlepszy model matematyczny odpowiada wartości CR4 bliskiej 1:

$$CR4 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Qs_i + \varepsilon) - \ln(Qo_i + \varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Qo_i + \varepsilon) - \ln(Qo + \varepsilon)]^2} \quad (12)$$

Współczynnik Nasha-Sutcliffe'a zmodyfikowany do postaci, która umożliwia ocenę skuteczności modelu w zakresie wysokich przepływów, to miara CR5. Największą wartość efektywności modelu wyraża liczba 1:

$$CR5 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qo_i + \bar{Qo})(Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qo_i + \bar{Qo})(Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad (13)$$

Wartości graniczne klas jakości modelu proponowane przez Poretę-Brandyk i innych (2010, za: Andersen i in. 2001) przedstawia tabela 1.

TABELA 1. Przedziały wartości statystycznych miar poprawności modelu (według Andersena i in. 2001, za: Poretta-Brandyk i in. 2010)

TABLE 1. Model performance categories to indicate the goodness level (Anderson et al. 2001, after Porretta-Brandyk et al. 2010)

Zakres miary CR1 Range of CR 15	Zakres miar CR2–CR5 Range of CR2–C5	Kategorie poprawności modelu Model quality category
< 0,05	> 0,85	doskonała/excellent
0,05–0,10	0,65–0,85	bardzo dobra/very good
0,10–0,20	0,50–0,65	dobra/good
0,20–0,40	0,20–0,50	słaba/satisfactory
> 0,40	< 0,20	niesatysfakcjonująca/poor

Zastosowanie modelu WetSpa w zurbanizowanej zlewni Białej – obszar aglomeracji Białystok

Charakterystyka hydrogeograficzna i hydrologiczna

Zlewnia rzeki Białej jest zlewnią nizinną, położoną w północno-wschodniej Polsce. Biała (Białka) jest rzeką IV rzędu, lewostronnym dopływem rzeki Supraśl. Według podziału fizyczno-geograficznego Kondrackiego (Kondracki 2001), zlewnia Białej leży w mezoregionie Wysoczyzna Białostocka (makroregion Nizina Północnopodlaska). Powierzchnia terenu jest zbudowana z utworów czwartorzędowych. Zlewnia Białej ma generalne nachylenie z południowego wschodu na północny zachód, ukształtowanie powierzchni terenu jest zróżnicowane. Największymi deniwelacjami charakteryzują się północno-wschodnie i wschodnie krańce zlewni i tam też występują największe wysokości terenu. Centralna i dolna część ma formę równinno-falistą, a przyujściowy fragment zlewni ma charakter zdecydowanie równinny i należy do doliny Supraśli (rys. 2). Powierzchnia topograficznej zlewni Białej wynosi 133 km².

Rzeka bierze początek pod Prostkami na wysokości około 168 m n.p.m., uchodzi do Supraśli na wysokości 115 m n.p.m. Bieg rzeki ma kierunek północno-zachodni, sieć hydrograficzna jest równomiernie rozłożona.

W obszarze zlewni podlegającym urbanizacji zarówno sieć cieków, jak i dolina są silnie przekształcone. Ponad 60% pokrycia zlewni stanowi Białystok (Tyszewski i in. 2009). Sieć kanalizacji deszczowej uzupełnia, a w znacznej mierze zastępuje powierzchniową sieć hydrograficzną. W granicach miasta zlokalizowane są 22 duże wyloty kanalizacji deszczowej. Ogółem w zlewni znajduje się 137 wylotów zrzutowych, w tym: 69 bezpośrednio uchodzących do rzeki głównej, a pozostałe – do jej dopływów lub rowów, kolejne 54 są projektowane (Tyszewski i in. 2009). Zurbanizowany charakter środkowej części zlewni powoduje występowanie niskich przepływów w okresach bezopadowych oraz gwałtowny wzrost przepływu podczas opadów i po opadach deszczu i śniegu.

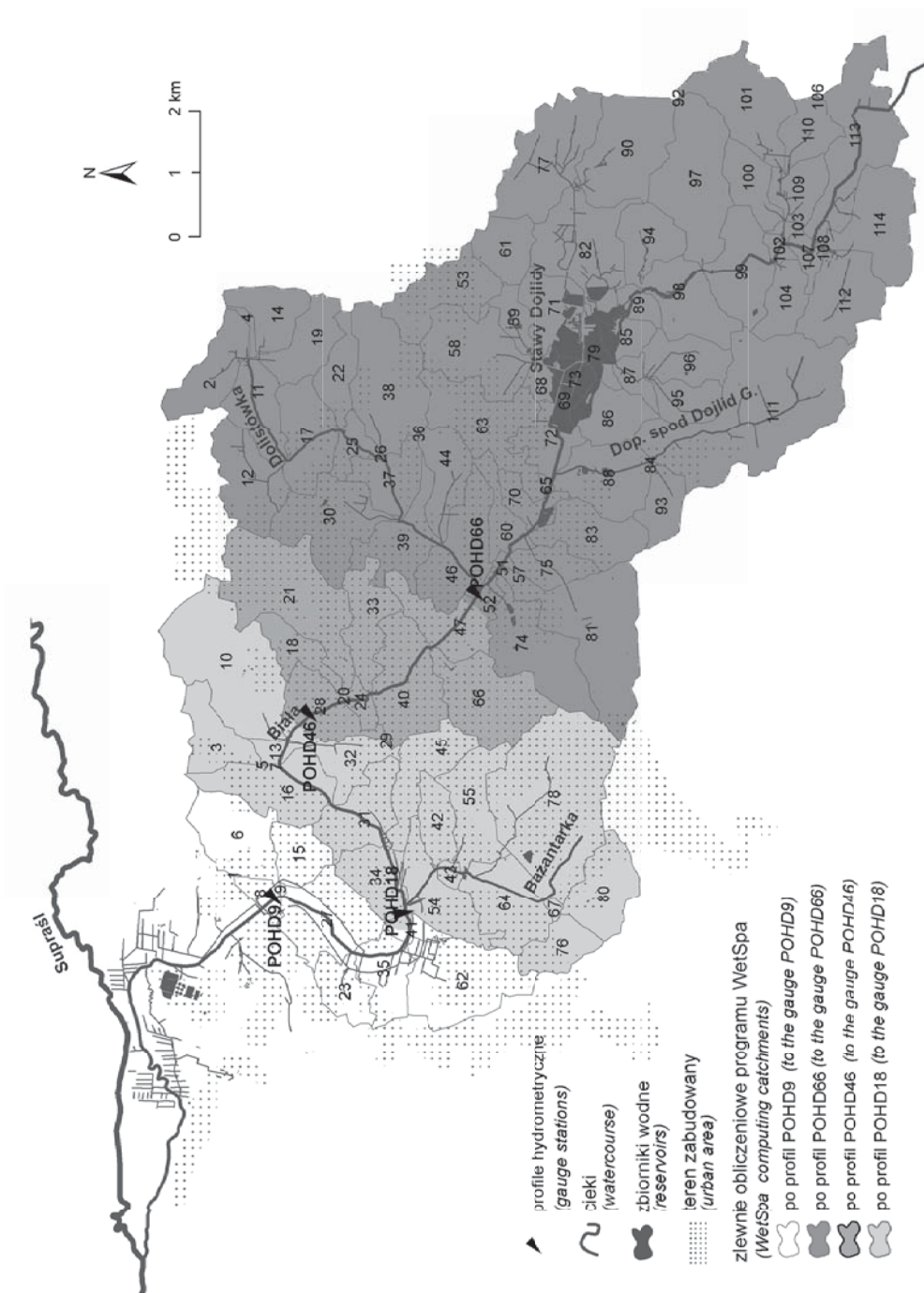
Dane hydrometeorologiczne

Program WetSpa wymaga następujących danych wejściowych: temperatura średnia dobowa, sumy opadu atmosferycznego oraz wartości ewapotranspiracji potencjalnej. Wykorzystano 6-godzinne ciągi danych temperatury i sumy opadów atmosferycznych z Białegostoku pozyskane z bazy danych meteorologicznych NOAA National Data Center (<http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>). Dane o ewapotranspiracji potencjalnej (PET) obliczono przy użyciu formuły Penman-Monteith (Allen i in. 1998) na podstawie danych ze stacji meteorolo-

gicznej SGGW zlokalizowanej w miejscowości Nowy Lipsk, położonej 80 km na północ od zlewni. Dobowe wartości PET były następnie przeliczane na 6-godzinny interwał symulacji modelu według proporcji: 10% wartości dobowej PET przypisano okresowi od godziny 0 do godziny 6, 40% – w godzinach 7–12, 40% – w godzinach 13–18, i 10% – w godzinach 19–24. Wartości przepływu uzyskano na podstawie teoretycznych krzywych natężenia przepływu opracowanych na podstawie stanów wody mierzonych urządzeniem Diver w interwale 20-minutowym, a następnie agregowanych do 6-godzinnego kroku czasowego modelowania (Tyszewski i in. 2009). Pomiary wykonywano w czterech przekrojach przedstawionych na rysunku 2 jako: POHD9, POHD18, POHD46 i POHD66.

Mapy cyfrowe

Parametry przestrzenne (lokalne) modelu oszacowano na podstawie warstw informacyjnych: mapy glebowo-rolniczej w skali 1 : 25 000 opracowanej przez IUNG w Puławach, mapy użytkowania terenu Corine Land Cover 2006 (<http://clc.gios.gov.pl/>) oraz numerycznego modelu terenu (NMT) opracowanego w wyniku interpolacji na podstawie poziomic z map topograficznych w skali 1 : 10 000. Wielkość komórki obliczeniowej w rastrowym modelu danych przyjęto równą 25 m. Numeryczny model terenu został wykorzystany do określania potencjalnych dróg odpływu ze zlewni i kierunków odpływu powierzchniowego. Proces wyznaczania dróg odpływu poprzedzony został modyfikacją NMT przez wcięcie w nim sieci cieków



RYSUNEK 2. Podział zlewni Białej na zlewnie elementarne (obliczeniowe)
 FIGURE 2. Segmentation of Biała River catchment for the purpose of runoff calculation

i kanalizacji burzowej na głębokość 2 metrów. Pozwoliło to narzucić rzeczywiste kierunków odpływu, które w środowisku miejskim nie zawsze układają się zgodnie ze spadkiem terenu. Dla obszaru miejskiego przyjęto zmienny stopień szczelności powierzchni terenu, wyrażany w postaci procentowej, w zależności od rodzaju użytkowania: dla obszarów zdefiniowanych jako przemysłowe i centra handlowe – 70% powierzchni nieprzepuszczalnej, ciągi komunikacyjne (drogi i koleje) – 50%, obszary mieszkalne – 30%, obszary zieleni miejskiej i obiekty rekreacyjno-sportowe – 5% (Liu 2004, Chormański in. 2008). Szczelność powierzchni na poziomie 70% oznacza, że powierzchnia ta z 70% wody tworzy odpływ, a pozostałe 30% wypełnia retencję glebową i filtruje do gruntu. Z uwagi na fakt, że na mapie glebowej obszary zabudowane pozbawione są informacji o typie gleby, przyjęto dla nich uśrednione parametry filtracji.

Schematyzacja zlewni cząstkowych

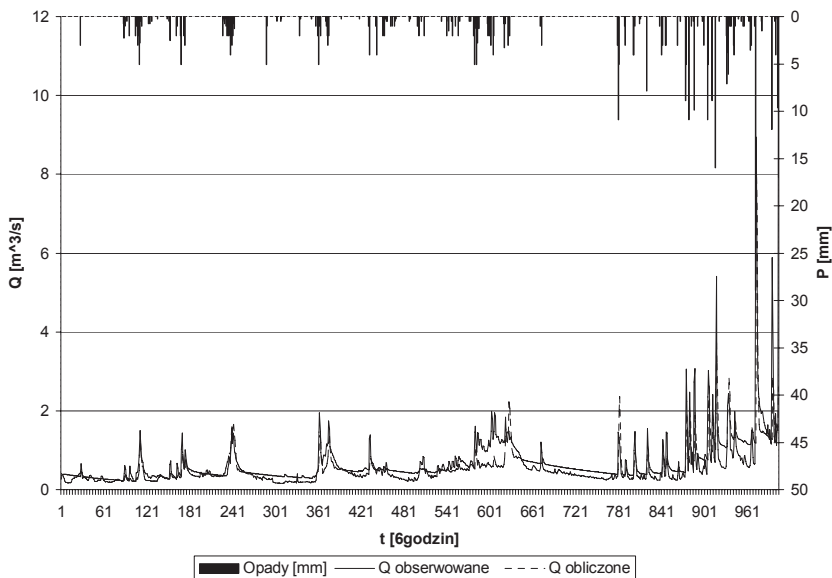
Zastosowano model o parametrach dyskretnie rozłożonych, w którym komórki rastrowe łączone są w grupy reprezentujące zlewnie elementarne o średniej wielkości 1 km², a parametry przestrzenne modelu obliczane są jako średnie w tych zlewniach. Podział zlewni Białej na zlewnie elementarne, opracowany w programie WetSpa, przedstawiono na rysunku 2, analizującym wielkość zlewni. W sumie określono 114 zlewni elementarnych – analitycznych, zaznaczonych na rysunku 2 innym odcieniem szarości, w zależności od przynależności do zlewni obserwowanej (profile pomiarowe POHD9, POHD18, POHD46

i POHD66). Zlewnia po profil POHD66 obejmuje głównie obszary wykorzystywane rolniczo oraz przedmieścia Białegostoku i jest najmniej zurbanizowana. W każdym kolejnym przekroju stopień zurbanizowania zlewni zwiększa się, tak że zlewnia po profil POHD9, zlokalizowany w Zawadach, obejmuje całe miasto.

Parametry globalne kalibrowano metodą półautomatyczną, z wykorzystaniem algorytmów programu PEST (Doherty i in. 1994). Parametry te umożliwiają odzwierciedlenie ogólnych warunków hydrologicznych w zlewni – wilgotności początkowej gleb, głębokości położenia zwierciadła wód podziemnych, krzywej opadania odpływu wód podziemnych, udziału odpływu powierzchniowego, podpowierzchniowego i podziemnego w odpływie całkowitym, parametrów charakteryzujących procesy topnienia śniegu. Kalibrację modelu przeprowadzono na podstawie przepływu w przekroju POHD18, poniżej ujścia Bażantarki w okresie 24.10.2008–01.07.2009, w interwale 6-godzinnym, a weryfikację – dla przepływów obserwowanych w przekroju pomiarowym powyżej Zawad (POHD9).

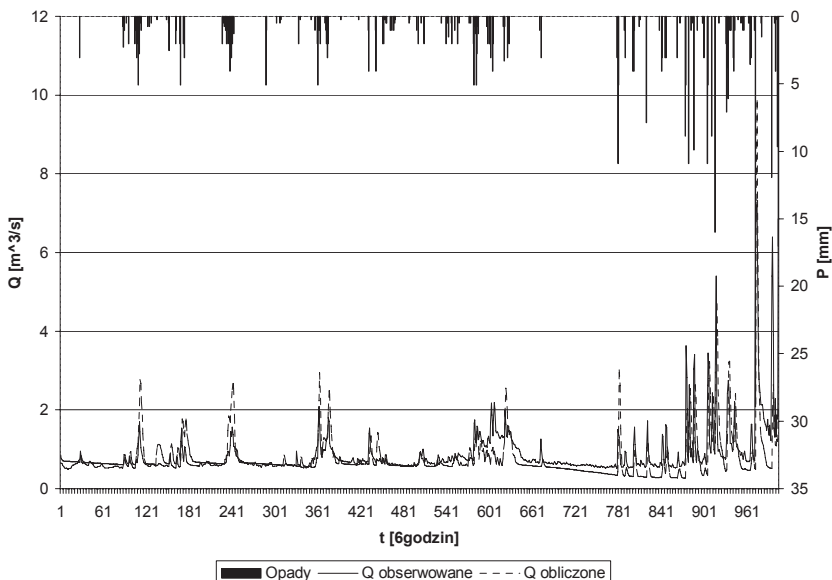
Wyniki modelowania

Wyniki w postaci obserwowanych i obliczonych hydrogramów odpływu przedstawiono na rysunku 3 (kalibracja) oraz na rysunku 4 (weryfikacja). Statystyczne miary poprawności modelu, pozwalające na niezależną ocenę jakości modelu, podano w tabeli 2. Można stwierdzić, że dostosowanie modelu jest bardzo dobre w przypadku określa-



RYSUNEK 3. Opady i przepływy obserwowane i obliczone w profilu pomiarowym POHD18 w okresie kalibracyjnym 24.10.2008–01.07.2009

FIGURE 3. Rainfall and discharges, observed and calculated in the measure station POHD18 in the calibration period 24.10.2008–01.07.2009



RYSUNEK 4. Opady i przepływy obserwowane i obliczone w profilu pomiarowym POHD9 w okresie kalibracyjnym 24.10.2008–01.07.2009

FIGURE 4. Rainfall and discharges, observed and calculated in the measure station POHD9 in the verification period 24.10.2008–01.07.2009

TABELA 2. Miary poprawności modelu obliczone w przekroju pomiarowego POHD18 (kalibracja) oraz przekroju pomiarowego POHD9 (weryfikacja)
 TABLE 2. Model performance measures calculated for measurement cross-section POHD18 (calibration) and POHD9 (verification)

Wyszczególnienie Specification	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5
Wartość optymalna Optimum value	0	1	1	1	1
Kalibracja (POHD18) Calibration (POHD18)	-0,029	0,626	0,483	0,465	0,522
Weryfikacja (POHD9) Verification (POHD9)	-0,005	0,498	0,508	0,553	0,522

nia bilansu wodnego (CR1), a średnie – w przypadku odtwarzania hydrogramów odpływu. Model dobrze reaguje na intensywne opady nawalne, odtwarzając hydrogramy fal wezbraniowych bez opóźnień, jednakże wartość odpływu jest często niedoszacowana lub zawyżona. Niskie przepływy odtwarzane są poprawnie, lecz zauważyć można zbyt wolną reakcję modelu w wyznaczeniu przebiegu krzywej wysychania. Ponadto występują wyraźne różnice między obserwowanym i obliczonym odpływem w okresie roztopowym.

Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki symulacji należy ocenić jako poprawne, szczególnie w odniesieniu do zastosowanych uproszczeń i ze względu na słabe dane pomiarowe. Przepływy w okresie kalibracji zostały obliczone na podstawie krzywych teoretycznych (stany wody były mierzone z interwałem 20 minut), co skutkować może błędą (zawyżoną), z uwagi na przyjętą funkcję wielomianową (Tyszewski i in. 2009), ekstrapolacją wartości przepływu, szczególnie w strefie stanów wysokich. Ponadto przyjęcie założenia, że suma opadów jest rozłożona równo-

miennie w zlewni, stanowi kolejne źródło znacznych niedokładności obliczeń. Założenie to wynika z ograniczenia posiadanych danych meteorologicznych do jednego posterunku i może powodować zawyżone wyniki symulacji przepływu w okresach opadów nawalnych, które często mają charakter lokalny. Model prawidłowo odtwarza reakcję zlewni na opad deszczu, jednak proces formowania się wezbrań roztopowych jest w nim ujęty w sposób uproszczony. Niedokładność w predykcji przepływów niskich może być spowodowana faktem, że ewapotranspiracja potencjalna, będąca wejściem do modelu, opracowana została na podstawie danych zbieranych na stacji meteorologicznej zlokalizowanej poza zlewnią, z dala od aglomeracji miejskiej. Model WetSpa ma charakter bilansowy, a nie hydrodynamiczny, nie uwzględnia wpływu budowli hydrotechnicznych na przebieg hydrogramu odpływu oraz retencyjności polderów zalewowych. Uzyskanie lepszego dopasowania modelu dla zlewni Białej wymagałoby uszczegółowienia wykorzystywanych danych wejściowych, a w szczególności: określenia przestrzennego rozkładu pola opadu na podstawie kilku posterunków, szczególnie w obszarach zurbanizowanych; udo-

skonalenia krzywych konsumpcyjnych, w tym również w strefie stanów wysokich – w każdym z przekrojów pomiarowych; uzyskanie danych hydrologicznych i klimatycznych umożliwiających przeprowadzenie symulacji w kroku czasowym co najmniej 1 godziny; uszczegółowienia informacji o szczelności podłoża i użytkowaniu terenu w obszarze zurbanizowanym i ich przestrzennym zróżnicowaniu, na przykład na podstawie analizy wysokorozdzielczych, aktualnych zdjęć satelitarnych z satelity Ikonos, Quickbird (rozdzielczość przestrzenna 1 m) lub WorldView2 (rozdzielczość przestrzenna 0,5 m).

Literatura

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. 1998: Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rzym.
- ANDERSEN J., REFSGAARD J., JENSEN K.H. 2001: Distributed hydrological modelling of the Senegal river basin; model construction and validation. *Journal of Hydrology* 247: 200–214.
- BANASIK K. 1987: Rainfall-runoff conceptual model for an urban watershed. Proc. XXII Congress of IAHR, and FICUD – Urban Drainage Hydraulics and Hydrology, Loussanne, Switzerland, 5: 299–300.
- BANASIK K., BARSZCZ M., HEJDUK L. 2007: Current and perspective flood flow consequences of land use changes in Sluzew Creek (suburb of Warsaw). In: Special Aspects of Urban Flood Management, Hamburger Wasserbau-Schriften, THH Hamburg: 3–16.
- BANASIK K., HEJDUK L., BARSZCZ M. 2008: Flood flow consequences of land use changes in a small urban catchment of Warsaw. Proceedings 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland.
- BANASIK K., HEJDUK L., GRADOWSKI L., SIKORSKA A. 2009: Reduction of the flood flow hydrographs by a small reservoir on the Sluzew Creek in Warsaw, Poland 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment: 5143–5150.
- BARSZCZ M. 2009a: Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 3 (45): 3–21.
- BARSZCZ M. 2009b: Analysis of freshets caused by heavy rainfall on small urbanized drainage basin of Sluzew Stream. *Studia Geotechnica et Mechanica* 4: 3–15.
- BATELAAN O., WANG Z.M., De SMEDT F. 1996: An adaptive GIS toolbox for hydrological modeling. In: Application of geographic information systems in hydrology and water resources management. Ed. K. Kovar, H.P. Nachtnebel. IAHS Publ. 235.
- CHEN J., ADAMS B.J. 2007: A derived probability distribution approach to stormwater quality modelling. *Adv. Water Resour.* 30: 80–100.
- CHORMAŃSKI J., BATELAAN O. 2011: Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchment with significant contribution of organic soil. Upper Biebrza case study. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Land Reclamation* 43 (1): 25–35.
- CHORMAŃSKI J., MICHAŁOWSKI R. 2011: Model hydrologiczny zlewni Wet-Spa zintegrowany z modulem obliczeniowym w środowisku ArcGIS. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 20 (3): 196–206.
- CHORMAŃSKI J., Van De VOORDE T., De ROECK T., BATELAAN O., CANTERS F. 2008: Improving Distributed Runoff Prediction in Urbanized Catchments with Remote Sensing based Estimates of Impervious Surface Cover, *Sensors*, 8: 910–932.
- De SMEDT F., LIU Y.B., GEBREMESKEL S. 2000: Hydrologic modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. In: Risk Analysis II. Ed. C.A. Brebbia. WTI Press, Southampton, Boston: 295–304.

- DOHERTY J., BREBBER L., WHYTE P. 1994: PEST: model independent parameter estimation. User manual. Watermark Computing Trademarks, Australia.
- GEIGER W., DREISEITL H. 1999: Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych. Oficyna Wyd. Projprzem EKO, Bydgoszcz.
- GUTRY-KORYCKA M. 2003: Możliwości modelowania odpływu ze zlewni zurbanizowanych i uprzemysłowionych. W: Człowiek i woda. Red. T. Szczypek, M. Rzętała. Wyd. PTG – Oddział Katowicki: 38–53.
- GUTRY-KORYCKA M. 2005: Urbanization in the global change development syndrome. *Global Change* 12: 7–21.
- GUTRY-KORYCKA M. 2007: Odpływ ze zlewni zurbanizowanych. *Prace i Studia Geograficzne* 38: 37–56.
- KONDRACKI J. 2001: Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- LARM T. 2000: Stormwater quantity and quality in a multiple pond-wetland system: Flemingsbergsviken case stud. *Ecol. Eng.* 15: 57–75.
- LIU Y.B. 2004: Development and application of a GIS-based hydrological model for flood prediction and watershed management. Vrije Universiteit Brussel Press, Brussel.
- LIU Y.B., GEBREMESKEL S., De SMEDT F., PFISTER L. 2002: Flood prediction with the WetSpa model on a catchment scale. In: Flood Defence. Ed. B.S. Wu, Z.Y. Wang, G.Q. Wang, G.H. Huang, H.W. Fang, J.C. Huang. Science Press, New York.
- LIU Y.B., De SMEDT F., HOFFMAN L., PFISTER L. 2004: Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environmental Modeling and Assessment* 9: 227–235.
- LIU Y.B., GEBREMESKEL S., De SMEDT F., HOFFMANN L., PFISTER L. 2006: Predicting storm runoff from different land-use classes using a geographical information system-based distributed model. *Hydrological Processes* 20, 533–548.
- MULVANY T.J. 1851: On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland 4, 18–33.
- NASH J., SUTCLIFFE J. 1970: River ow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- OKSIUTA M. 2007: Ocena odpływu wezbraniowego ze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne* 38: 57–71.
- OKSIUTA M., GUTRY-KORYCKA M. 2008: Land use – land covers change of Służewiecki Stream basin and theirs hydrological consequence. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation* 39: 139–150.
- PARK M.-H., SWAMIKANNU X., STENSTROM M.K. 2009: Accuracy and precision of the volume-concentration method for urban stormwater modeling. *Water Res.* 43: 2773–2786.
- PETERS N.E. 2009: Effects of urbanisation on stream water quality in the city of Atlanta, Georgia, USA. *Hydrological Processes* 23: 2860–2878.
- PILGRIM D., CORDERY I. 1992: Flood runoff. In: Hanbook of Hydrology Ed. D.R. Maidment. McGraw-Hill, New York: 9.1–9.41.
- PORRETTA-BRANDYK L., CHORMAŃSKI J., IGNAR S., OKRUSZKO T., BRANDYK A., SZYMCZAK T., KRĘŻAŁEK K. 2010: Evaluation and verification of the WetSpa model based on selected rural catchments in Poland. *J. Water and Land Development* 14: 115–133.
- PORETTA-BRANDYK L., CHORMAŃSKI J., OKRUSZKO T., BRANDYK A. 2011: Automatic calibration of the WetSpa distributed hydrological model for small lowland catchments. In: Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment, Geoplanet: Earth and Planetary Sciences. Ed. D. Mirosław-Świątek, T. Okruszko. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 43–62.
- SKOTNICKI M., SOWIŃSKI M. 2009: Comparative Study of Approaches for Hydraulic Width Determination of Sub-Catchments in Urban Stormwater Model. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Ohrid/Macedonia, 1–5 September 2009. Paper A-07.

- THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R. 1955: The water balance. *Publications in Climatology* 8, 1: 1–86.
- TOURBIER J.T., WESTMACOTT R. 1981: Water resources protection technology: A handbook of measures to protect water resources in land development. Urban Land Institute, Washington.
- TYSZEWSKI S., KARDEL I., PUSŁOWSKA-TYSZEWSKA D., OKRUSZKO T., STANCZYK T., OGLECKI P., CHORMANSKI J., MIROSLAW-ŚWIĄTEK D., MICHALOWSKI R., POLAK W. 2009: Studium hydrograficzne doliny rzeki Białej z wytycznymi do zagospodarowania rekreacyjno-wypoczynkowego i elementami małej retencji oraz prace hydrologiczne niezbędne do sporządzenia dokumentacji hydrologicznej. Warszawa.
- WANG Z.M., BATELAAN O., De SMEDT F., 1996: A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Phys. Chem. Earth* 21 (3): 189–193.
- WITTENBERG H., SIVAPALAN M., 1999: Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *J. Hydrol.* 219: 20–33.

Summary

Semi-distributed model of basin in urban area. Paper treats on calibration and verification of the WetSpa hydrological semi-distributed model, for an urbanized catchment. Analysis was conducted for the area of Biała River catchment, which is with 60% urbanized. The model used shows good fit of calculated and observed hydrograph as well as statistical model quality measures. Therefore due to assumed simplifications and lack in hydro-meteorological data, it is a need to continue analytical work.

Authors' addresses:

Jarosław Chormański, Ignacy Kardel,
Dorota Mirosław-Świątek, Tomasz Okruszko
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: j.chormanski@levis.sggw.pl

Dorota Pusłowska-Tyszewska
Politechnika Warszawska
Katedra Gospodarki Wodnej
pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa
Poland