PRZEGLĄD GEOGRAFICZNY
2017, 89, 1, s. 155-164

Ekspozycja na ryzyko powodziowe ze strony Wisły w Warszawie

The exposure of built-up areas in the City of Warsaw to flooding by the River Vistula

MACIEJ LENARTOWICZ, ARTUR MAGNUSZEWSKI
Zakład Hydrologii, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski
00-927 Warszawa, Krakowskie Przedmieście 30; asmagnus@uw.edu.pl

Zarys treści. Na przykładzie Wisły w Warszawie przedstawiono nową metodę oceny ekspozycji na zagrożenie powodziowe. Najwyższe (graniczne) przepływy powodzi katastrofalnej wyznaczono na podstawie tzw. 'retro modelingu' oraz wykresu wskaźnika potencjału powodziowego Françou. Ekspozycję na zagrożenie oceniono na podstawie objętości zatopionych budynków przy przyjętym scenariuszu powodzi o czasie powtarzalności 100 lat. Maksymalna uzyskana głębokość zatopienia w przyjętej siatce kwadratów 100 m × 100 m wynosiła 7,2 m, a objętość zatopionych budynków kształtowała się od 0 do ponad 90 000 m^3. Zakres ten podzielono na 10 klas zgodnie z metodą decyli. Zaprezentowana metoda może być wykorzystana do oceny ryzyka powodziowego.
Słowa kluczowe: Wisła, Warszawa, zagrożenie powodziowe, ryzyko powodziowe.

Wprowadzenie

Jednym ze sposobów zmniejszenia ryzyka powodziowego jest właściwa gospodarka przestrzenna. Dotyczy to zwłaszcza miast, które rozwijają się często przez zabudowę terenów położonych w strefie zagrożenia powodziowego. Problem dotyczy także lokalizacji w istniejących dzielnicach miast nowych budynków użyteczności publicznej, istotnych dla funkcjonowania miasta (np. szpitale, szkoły) lub inwestycji przemysłowych. Do podjęcia właściwej decyzji lokalizacyjnej lub oceny obecnego stanu przydane są mapy ryzyka powodziowego, które pokazują koszt potencjalnych strat powodziowych. Wielkość strat powodziowych zależy od stopnia ekspozycji na zagrożenie powodziowe. Wykonanie map ryzyka powodziowego narzuciła Dyrektywa Powodziowa, gdyż są one podstawą planowania w gospodarce wodnej. Podejmowane są też prace nad przystosowaniem miast

http://dx.doi.org/10.7163/PrzG.2017.1.8

do spodziewanych zmian warunków obiegu wody w zmieniającym się klimacie. W pracy A. Magnuszewskiego i M. Porczek (2015) przedstawiono metodę oceny ekspozycji gmin w Polsce na zagrożenia powodziowe, oparte na wyznaczeniu powierzchni zabudowy zlokalizowanej w zasięgu stref zalewowych w dolinach dużych rzek. W tym opracowaniu przedstawiamy propozycję oceny ekspozycji na ryzyko powodziowe ze strony Wisły w Warszawie. Parametrem służącym do oceny ekspozycji jest objętość zatopionych budynków w strefach potencjalnie zagrożonych wodą stuletnią.

Opis terenu badań

Warszawa została zlokalizowana w miejscu naturalnego zwężenia doliny rzecznej, na styku trzech mezoregionów fizycznogeograficznych: Równiny Warszawskiej, Równiny Wołomińskiej i Kotliny Warszawskiej. Najstarsza lewobrzeżna część miasta została ulokowana na wysokim brzegu Równiny Warszawskiej, prawobrzeżne dzielnice zajmowały początkowo pierwszy taras nadzalewowy zwany tarasem praskim. W miarę rozwoju miasta zabudowa zaczęła wkraczać także w tereny o większym zagrożeniu powodzią, powstały dzielnice miasta położone na rozległych równinach zalewowych, np. Saska Kępa, Gocławek, Wilanów, Czerniaków. Obwałowanie Wisły we Warszawie i jej regulacja jaka dokonała się na przełomie XIX i XX w. wykształciły zwężenie drogi wód wielkich zwane „gorsetem warszawskim".

Zestawienia historycznych powodzi na Wiśle w rejonie Warszawy znajdują się w pracach J. Kobendziny (1954), Z. Mikulskiego (1954), Z. Tyszki (1954), R. Girgusia i W. Strupczewskiego (1965), E. Bogdanowicz i innych (2000), J. Wierzbickiego (2001), B. Fal i P. Dąbrowskiego (2001a,b), M. Gutry-Koryckiej (2007, 2010). Opisane powodzie należą do katastrofalnych, interesujące jest pytanie jak duży może być najwyższy (graniczny) przepływ katastrofalnej powodzi w Warszawie. Do oszacowania takiego przepływu zastosować można trzy podejścia:

1) oszacowanie przepływu o złożonym prawdopodobieństwie przewyższenia za pomocą metod probabilistycznych;
2) zastosowanie tzw. 'retro modelingu', czyli odtworzenie przepływu jaki został zarejestrowany przez historyczne znaki wielkiej wody za pomocą modelu hydrodynamicznego;
3) określenie górnej obwiedni na wykresie wskaźnika potencjału powodziowego k, zaproponowanego przez Françou (Rodier i Roche, 1984).

ad 1) E. Fal i P. Dąbrowski (2001a) oszacowali przepływ wody tysiącletniej (o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,1 %) dla Wisły w Warszawie na wartość Qp 0,1% = 9960 m^3s^{-1};

ad 2) Przepływ, który spowodował największą historyczną powódź z 27 lipca 1844 r. w Warszawie określony metodą 'retro modeling' z użyciem dwuwymiarowego modelu hydrodynamicznego CCHE2D wynosił Q=8250 m^3s^{-1} (Kuźniar i Magnuszewski, 2010);

ad 3) Górna obwiednia na wykresie rozkładu wskaźnika *k* w profilu podłużnym Wisły wyznacza dla zlewni zamkniętej profilem Warszawa wielkość maksymalnego przepływu rzędu 9500 m^3s^{-1} (Magnuszewski, 2013).

Współczesny rozstaw wałów przeciwpowodziowych i bulwarów w obrębie miasta zacieśnia drogę wód wielkich do zaledwie 470-480 m w km 511-514. Rzędne wałów o zmniejszonym rozstawie powinny według projektów zabezpieczać miasto przed wodą *Qp*0,1% (Biernacki, 2000). Przepływy uzyskane z oszacowania metodą 'retro modeling' i obwiedni wartości wskaźnika *k* wskazują, że przepływ powodzi katastrofalnej w profilu Warszawa może osiągnąć wartości zbliżone do wody projektowej dla rzędnej korony wałów. W scenariuszach powodzi w Warszawie obok awarii wałów w wyniku filtracji należy zatem brać także pod uwagę scenariusz przelania się wody nad koroną wałów w czasie powodzi katastrofalnej. Szczególnego znaczenia nabiera w tym kontekście sprawa utrzymania odpowiedniej przepustowości hydraulicznej odcinka śródmiejskiego, która jest ograniczana przez rozwój gęstej roślinności na nowych powierzchniach tarasów rzecznych tworzących się w międzywalu (Magnuszewski i inni, 2012).

Mapy ekspozycji na ryzyko powodziowe

We współczesnej hydrologii posługujemy się pojęciem ryzyka powodziowego, które pozwala oszacować zarówno prawdopodobieństwo powodzi, jak i jej skutki materialne. Do kategorii ryzyka powodziowego zaliczana jest:
- szacunkowa liczba ludności zamieszkującej obszar zagrożony;
- budynki mieszkalne oraz obiekty o szczególnym znaczeniu społecznym (tj. szpitale, szkoły, przedszkola, hotele, centra handlowe i inne);
- obszary i obiekty zabytkowe;
- obszary chronione, tj. ujęcia wód, strefy ochronne ujęć wody, kąpieliska, obszary ochrony przyrody;
- potencjalne ogniska zanieczyszczeń wody w przypadku wystąpienia powodzi, tj. zakłady przemysłowe, oczyszczalnie ścieków, przepompownie ścieków, składowiska odpadów, cmentarze;
- wartości potencjalnych strat w podziale na poszczególne klasy użytkowania terenu, tj. tereny zabudowy mieszkaniowej, tereny przemysłowe, tereny komunikacyjne, lasy, tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, użytki rolne, wody.

Na ryzyko powodziowe ma wpływ nie tylko prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi, lecz również tzw. ekspozycja na niebezpieczeństwo (oddalenie od rzeki lub odpowiednia wysokość terenu), a także podatność infrastruktury miejskiej na potencjalne zniszczenia w czasie powodzi. Ryzyko powodziowe może być zatem zmniejszane na drodze unikania niebezpieczeństwa przez zmniejszanie ekspozycji na zagrożenie i odpowiednie przystosowanie się do zagrożenia. Lokalizacja zabudowy w ramach planowania przestrzennego jest uważana za jeden z najskuteczniejszych sposobów redukcji ryzyka powodziowego.

W końcu 2015 r. w ramach unijnej Dyrektywy Powodziowej wykonano dla głównych rzek w Polsce mapę wstępnej oceny ryzyka powodziowego (WORP), mapy zagrożenia powodziowego (MZP), mapy ryzyka powodziowego (MRP) i plany zarządzania ryzykiem powodziowym (PZRP). Wyniki opracowań udostępnianie są w Internecie w ramach projektu „Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami" (ISOK).

Na mapach zagrożenia powodziowego przedstawiono obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie (raz na 500 lat), średnie (raz na 100 lat) bądź wysokie (raz na 10 lat). Pokazano także obszary zagrożone powodzią w przypadku zniszczenia lub uszkodzenia wału przeciwpowodziowego. Istotną informacją przy podejmowaniu decyzji lokalizacyjnych jest głębokość zatopienia terenu, a w obszarach miejskich także prędkość przepływu wody w przypadku powodzi.

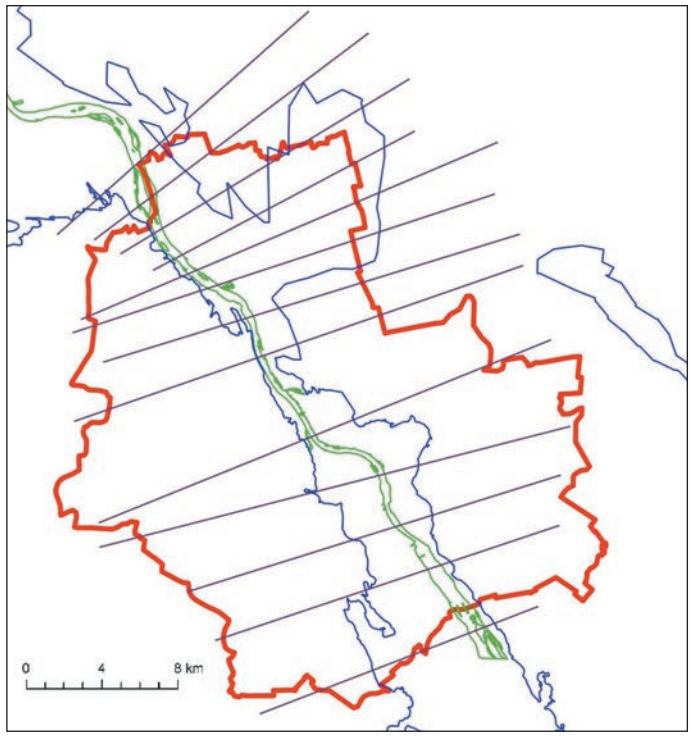
Ograniczeniem uzyskanych wyników jest przyjęcie założenia, że jeśli wezbranie o przyjętym okresie powtarzalności mieści się w międzywalu (nie powodując przelania nad koroną wałów), to dany obszar na tzw. zawalu jest bezpieczny, nawet jeśli rzędne terenu są położone poniżej rzędnej poziomu wysokiej wody.

Opis metody

W tym opracowaniu podjęto próbę oceny stopnia ekspozycji Warszawy na ryzyko powodziowe w scenariuszu awarii obwałowania przy przepływie wody stuletniej. Wykorzystano wyniki modelowania hydrodynamicznego dostarczone przez Urząd Miasta Stołecznego Warszawa z obliczoną rzędną maksymalnego poziomu wody stuletniej. Rzędne maksymalnego poziomu wody będące wynikiem modelowania posłużyły do wyznaczenia izolinii rzędnych zwierciadła wody powodziowej. Izolinie wykreślono ręcznie, biorąc pod uwagę orientację doliny Wisły i zasięg maksymalnego zalewu powodziowego (ryc. 1).

Maksymalny zasięg zagrożenia powodziowego wyznaczono na postawie syntezy dwu opracowań: mapy wstępnej oceny ryzyka powodziowego (WORP, 2011) oraz mapy obszarów zagrożonych podtopieniami w Polsce (PIG, 2007). Metoda przyjęta w opracowaniu PIG (2007) pozwala wyznaczyć maksymalny zasięg powodzi, gdyż opiera się na analizie rozmieszczenia osadów rzecznych i form terenu utworzonych w holocenie przez procesy fluwialne, wydzielonych na szczegółowej mapie geologicznej Polski.

Kolejnym krokiem było obliczenie modelu ukształtowania zwierciadła wielkiej wody, zapisanego jako dane rastrowe. W tym celu w programie ILWIS wykonano liniową interpolację między izoliniami do siatki rastra o rozdzielczości 5 m. Porównując rzędne terenu z cyfrowego modelu terenu udostępnionego przez Urząd Miasta Stołecznego Warszawy i modelu zwierciadła wody uzyskano mapę głębokości zatopienia doliny.



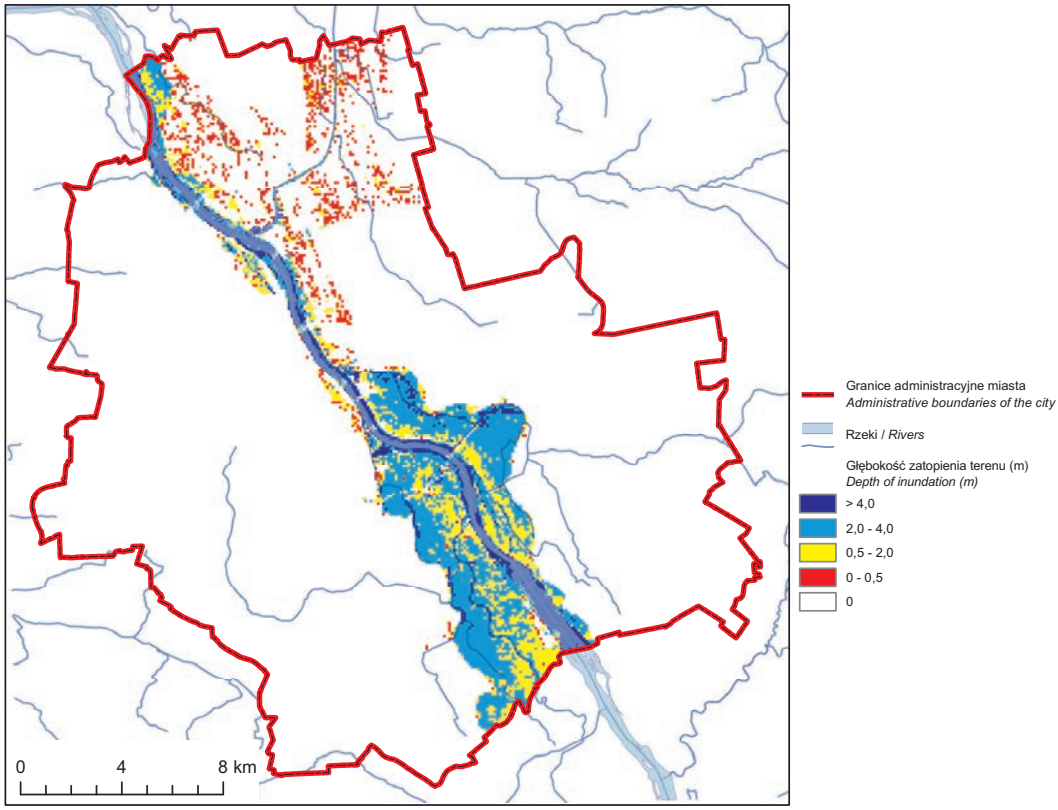
Ryc. 1. Rozmieszczenie izolinii obrazujących ukształtowanie zwierciadła 100-letniej wody powodziowej Wisły w Warszawie

Distribution of contour lines representing the level of the Vistula in Warsaw in the circumstances of a flood 100 years recurrence time

Mapę głębokości zatopienia doliny ograniczono do obszaru, który znajduje się w dolinie i może być potencjalnie objęty zasięgiem powodzi. Uzyskano maksymalną wartość głębokości zatopienia 7,2 m. W miejscach, gdzie rzędna terenu jest wyższa niż rzędna modelowanego zwierciadła wody, za głębokość podtopienia uznano wartość 0 m. Zgodnie z klasyfikacją przyjętą na Mapach Ryzyka Powodziowego wykonanych w ramach projektu ISOK, obliczone głębokości zatopienia podzielono na następujące klasy (ryc. 2):

– Klasa 0 – brak zatopienia – 0 pkt,
– Klasa 1 – zatopienie na głębokość 0-0,5 m – 10 pkt,
– Klasa 2 – zatopienie na głębokość 0,5-2,0 m – 20 pkt,
– Klasa 3 – zatopienie na głębokość 2,0-4,0 m – 25 pkt,
– Klasa 4 – zatopienie na głębokość powyżej 4,0 m – 30 pkt.

W kolejnym kroku zagregowano uzyskany obraz w siatce kwadratowej o rozmiarze 100 m.



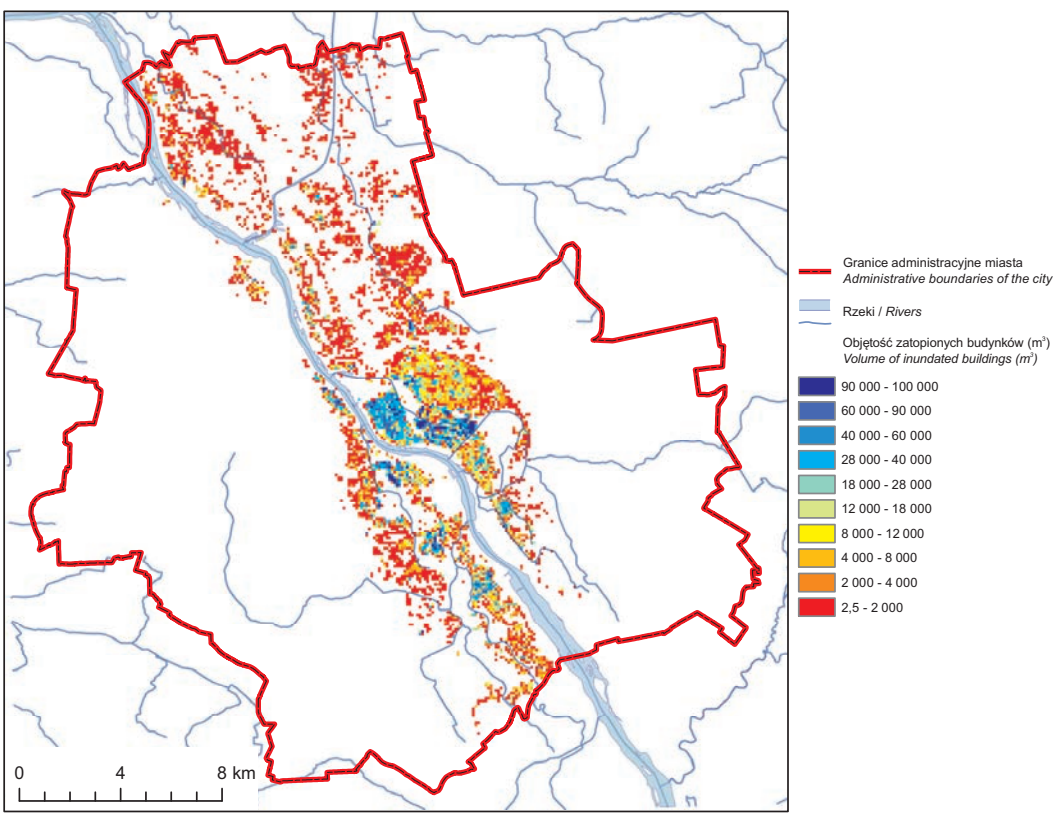
Ryc. 2. Głębokość zatopienia terenu w scenariuszu powodzi wywołanej wodą 100-letnią Wisły w Warszawie pokazana w przedziałach 5 klas i siatce kwadratów 100 m

Depth of the terrain inundation by the Vistula resulting from a 100-year recurrence flood in the City of Warsaw, as assigned to 5 classes, and with a grid resolution of 100 m

Informację o głębokościach zatopienia terenu nałożono na mapę obrysów budynków uzyskaną od Urzędu Miasta Stołecznego Warszawa. W operacji logicznego przecięcia warstw tematycznych uzyskano informację o głębokości zatopienia budynku, a dokonując działania na atrybutach pomnożono powierzchnię budynku przez głębokość zatopienia, co dało objętość zatopionych budynków. Obliczenia ograniczono do strefy objętej maksymalnym zasięgiem powodzi. Objętości zatopień zagregowano w polach siatki kartogramu o wielkości 100 m.

Uzyskane wartości w podziale na siatkę kwadratową o wymiarze 100 m kształtują się od 0 do ponad 90 000 m^3. Ich pełen zakres podzielono z wykorzystaniem metody decyli (przy założeniu 10 klas), którym przyznano odpowiednie rangi od 1 do 10 (ryc. 3). Metoda decyli jest opisana np. w https://www.statystyczny.pl/jak-obliczamy-kwantyle/.

Przyjęto następującą klasyfikację zależnie od objętości zatopionych budynków (m^3):
– 0-2000 – 1 pkt
– 2000-4000 – 2 pkt
– 4000-8000 – 3 pkt
– 8000-12 000 – 4 pkt
– 12 000-18 000 – 5 pkt
– 18 000-28 000 – 6 pkt
– 28 000-40 000 – 7 pkt
– 40 000-60 000 – 8 pkt
– 60 000-90 000 – 9 pkt
– powyżej 90 000 – 10 pkt.



Ryc. 3. Ekspozycja zabudowy na zagrożenie powodziowe Wisły przedstawione z wykorzystaniem 10 klas i przeliczone do siatki kwadratów 100 m

Exposure of the built-up area of Warsaw to flooding by the Vistula River, by reference to 10 classes and a grid resolution of 100 m

Podsumowanie

Przedstawiona metoda wyznaczania objętości zatopionych budynków jest prostym sposobem oceny ekspozycji zabudowy Warszawy na potencjalnie zagrożenie w przypadku awarii wałów powodziowych. Uzyskany obraz pozwala na zróżnicowanie stopnia ekspozycji na ryzyko powodziowe dzielnic miasta. Jest to wynik, którego nie dają mapy ryzyka powodziowego opracowane w ramach Dyrektywy Powodziowej, w których zakłada się, że woda stuletnia nie spowoduje awarii wałów i strat powodziowych. Prezentowane wyniki pochodzą z większego opracowania, jakim jest mapa wykonana dla Warszawy na zlecenie Fundacji Instytut na rzecz Ekorozwoju w ramach Projektu LIFE13 INF/PL/000039 „Life_Adaptcity_pl Preparation of a strategy of adaptation to climate change with use of city climate mapping and public participation", finansowanego ze środków instrumentu finansowego LIFE+ Komisji Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Piśmiennictwo / References

Bogdanowicz E., Fal B., Dobrzyńska J., 2000, *Charakterystyki hydrologiczne*, [w:] *Wisła w Warszawie*, Biuro Zarządu m.st. Warszawy, Wydział Planowania Przestrzennego i Architektury, s. 9-13.

Biernacki Z., 2000, *Geomorfologia i wody powierzchniowe*, [w:] *Wisła w Warszawie*, Biuro Zarządu m.st. Warszawy, Wydział Planowania Przestrzennego i Architektury, Warszawa

Fal B., Dąbrowski P., 2001a, *Dwieście lat obserwacji i pomiarów hydrologicznych Wisły w Warszawie: Obserwacje stanów wody*, Gospodarka Wodna, 11, s. 461-467.

Fal B., Dąbrowski P., 2001b, *Dwieście lat obserwacji i pomiarów hydrologicznych Wisły w Warszawie: Przepływy Wisły w Warszawie*, Gospodarka Wodna, 12, s. 503-510.

Girguś R., Strupczewski W., 1965, *Wyjątki ze źródeł historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XVI*, PIHM, WKiŁ, Warszawa.

Gutry-Korycka M., 2007, *Wielkie wody Wisły środkowej w ujęciu historycznym*, Prace i Studia Geograficzne UW, 38, s. 85-103.

Gutry-Korycka M., 2010, *Katastrofalne powodzie Wisły poniżej Warszawy w zarysie historycznym*, [w:] A. Magnuszewski (red.), *Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 68, s. 99-108.

Kobendzina J., 1954, *Powodzie na Wiśle w okolicach Warszawy*, Gospodarka Wodna, 14, 4, s. 156-157.

Kuźniar P., Magnuszewski A., 2010, *Przepływ wód wielkich Wisły w Warszawie – rekonstrukcja powodzi historycznych*, [w:] A. Magnuszewski (red.), *Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Warszawa, 69, s. 109-118.

Magnuszewski A., 2013, *Wskaźnik powodziowości wezbrań o różnej genezie*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 36, s. 5-12.

Magnuszewski A., Gutry-Korycka M., Mikulski Z., 2012, *Historyczne i współczesne warunki przepływu wód wielkich Wisły w Warszawie cz. I i II*, Gospodarka Wodna, 1, s. 9-17; 2, s. 58-63.

Magnuszewski A., Porczek M., 2015, *Wskaźnik potencjału powodziowego i względna ekspozycja na niebezpieczeństwo powodziowe gmin w Polsce*, Prace i Studia Geograficzne UW, 57, s. 55-65.

Mikulski Z., 1954, *Katastrofalne powodzie w Polsce*, Czasopismo Geograficzne, 25, 4, s. 380-393.

PIG, 2007, *Mapa obszarów zagrożonych podtopieniami*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Rodier J.A., Roche M., 1984, *World Catalogue of Maximum Observed Floods*, IAHS Publications, 143.

Tyszka Z., 1954, *Powodzie w Polsce i ochrona przed nimi w zarysie historycznym*, Gospodarka Wodna, 4, s. 144-146.

Wierzbicki J., 2001, *Stałość pionowego układu koryta Wisły oraz położenia zwierciadła wód małych i wielkich na odcinku miejskim w Warszawie*, Gospodarka Wodna, 4, s. 143-149.

WORP, 2011, *Wstępna ocena ryzyka powodziowego*, IMGW, Warszawa.

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

MACIEJ LENARTOWICZ, ARTUR MAGNUSZEWSKI

THE EXPOSURE OF BUILT-UP AREAS IN THE CITY OF WARSAW TO FLOODING BY THE RIVER VISTULA

Determination of flood risk includes the element of exposure to flood damage. Proper siting of the important infrastructure of a city should take account of the factor that is danger of flooding. The case study of the City of Warsaw has been used to illustrate a new method for determining levels of exposure to flooding posed by the River Vistula. On the basis of retro-modelling, maximum possible flood discharge is a calculated $Q=8250\ m^3s^{-1}$. In turn, from the graph of the flood potential index by Françou, the value is $9500\ m^3s^{-1}$.

The Vistula Valley within Warsaw City is constrained by flood protective dikes and boulevards forming the so-called "Warsaw corset". The spacing of dikes and boulevards in Warsaw is only 470-480 m, at the point some 511-514 km along the River Vistula. The maximum range of potential flooding has been estimated by merging two maps, of which one presents a preliminary estimation of the flood risk as prepared in accordance with the EU Flood Directive, while the other is a map of potential flooding elaborated on the basis of the detailed geological map of Poland. The level reached by the kind of flood only recurring every 100 years was presented in the form of contour lines covering the city's potentially flooded area. By way of linear interpolation, a flood surface model was calculated – to a raster format of 5 m resolution. The digital terrain model of the City of Warsaw and Vistula Valley, as well as the geometry of buildings were obtained from the Geodetic Department of the City authority. Using logical operators the depth of inundation of buildings was calculated, along with inundation and the volume of

inundated buildings in the scenario of potential flooding only recurring every 100 years. The maximum depth of inundation is 7.2 m. The extent of inundation of buildings is subject to a classification into: class 0 – no inundation – 0 points; class 1 – inundation depth 0 – 0.5 m – 10 points; class 2 – inundation depth 0.5 – 2.0 m – 20 points; class 3 – inundation depths of 2.0 – 4.0 m – 25 points; class 4 – inundation depth exceeding 4.0 m – 30 points. The volume of inundated buildings varies from 0 to above 90.000 m^3. This range has been divided into 10 classes by reference to a percentile division. The obtained classes have been aggregated to 100 m grid data and presented in the context of the map of exposure to flood severe enough to recur only every 100 years. The method presented can be used in estimating both exposition and flood risk. The relevant data are easily available and GIS analysis represents a standard spatial data processing method. The results obtained here fall within the framework of a bigger Life_Adaptcity_pl project entitled "Preparation of a strategy of adaptation to climate change with use of city climate mapping and public participation".

http://rcin.org.pl