

WPLYW BŁĘDÓW NUMERYCZNEGO MODELU TERENU NA OCENĘ ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO, W OPARCIU O MODELOWANIE HYDRAULICZNE

Marcin Szwagrzyk

Uniwersytet Jagielloński

Bartosz Ślizewski, Mateusz Kramarczyk, Michał Szcześniak,
Paulina Adamaszek

BCE Kraków Sp. z o.o.

Streszczenie. Celem głównym artykułu było zbadanie, jak błędy Numerycznego Modelu Terenu (NMT) wpływają na wyniki modelowania hydraulicznego istotne z punktu widzenia podejmowania decyzji dotyczących ochrony przeciwpowodziowej, a więc na zasięgi oraz głębokości zalewu i określane na ich podstawie zagrożenie powodziowe. Drugim celem artykułu było określenie przydatności metod ograniczających ryzyko niedoszacowania zagrożenia, spowodowanego błędami NMT. Badanymi NMT były: numeryczny model terenu przygotowany na potrzeby projektu ISOK (nazywany dalej w tekście NMT ISOK) oraz obciążony większym błędem numeryczny model terenu przygotowany na potrzeby projektu LPIS (nazywany dalej NMT LPIS).

W celu odpowiedzi na te pytania dokonano analiz błędów NMT na analizowanym obszarze. W następnym kroku stworzono modele hydrauliczne jednowymiarowe w programie DHI Mike11, różniące się od siebie zastosowanym Numerycznym Modelem Terenu. Na podstawie wyników modelowania wygenerowano zasięgi stref zalewowych oraz ich głębokości. Następnie poddano je analizom, w celu określenia jak błąd NMT wpłynął na wielkości zagrożenia powodziowego. W przypadku modelu obciążonego dużym błędem (NMT LPIS) zastosowano metody mające na celu ograniczenie niedoszacowania zagrożenia powodziowego, spowodowanego błędem NMT: metodę miękką oraz metodę Monte Carlo. Wyniki analiz pokazały, że błąd NMT LPIS (na obszarze badań wynoszący średnio 70 cm) może doprowadzić do nieprawidłowego oszacowania wielkości zagrożenia powodziowego i w konsekwencji do podjęcia błędnych decyzji dotyczących lokalizacji działań

Adres do korespondencji – Corresponding author: mgr Marcin Szwagrzyk, Zakład Systemów Informacji Geograficznej, Kartografii i Teledetekcji, Uniwersytet Jagielloński, 30-387 Kraków, ul. Gronostajowa 7; mgr inż. Bartosz Ślizewski, mgr Mateusz Kramarczyk, mgr inż. Michał Szcześniak, mgr Paulina Adamaszek BCE Kraków Sp.z.o.o. ul., 30-102 Kraków, ul. Władysława Syrokomli 23/3; e-mail: mszwagrzyk@gis.geo.uj.edu.pl, biuro@bce-krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

przeciwpowodziowych. Metoda miękka w badanym przypadku nie ograniczyła tego ryzyka w wystarczającym stopniu, natomiast metoda Monte Carlo umożliwiła zarządzanie ryzykiem dzięki uzyskaniu mapy prawdopodobieństwa zalania obszaru.

Słowa kluczowe: strefy zalewowe, powódź, modelowanie hydrauliczne, NMT, błędy danych, niepewność, Monte Carlo

WSTĘP

Modelowanie hydrauliczne jest obecnie podstawowym narzędziem służącym do wyznaczania obszarów zagrożonych powodzią oraz do wymiarowania planowanych działań przeciwpowodziowych [Lin i in. 2006, Radoń i Piórecki 2012]. Z punktu widzenia oceny zagrożenia powodziowego, najistotniejszymi pochodnymi wyników modelowania hydraulicznego są zasięg oraz głębokość strefy zalewowej ukazane w postaci geoprzestrzennych plików rastrowych i wektorowych. W wyniku analiz przestrzennych, umożliwiających nakładanie na siebie powyższych warstw oraz np. danych dotyczących zabudowy i użytkowania terenu, są określane liczby zagrożonych budynków i mieszkańców oraz szacowane sumy strat powodziowych. Powyższe informacje są w pracach koncepcyjnych w Polsce podstawą decyzji dotyczących lokalizacji działań z zakresu ochrony przeciwpowodziowej [Kęsy i Włodarczyk 2014].

Jedną z najważniejszych składowych danych wejściowych do modelowania hydraulicznego jest Numeryczny Model Terenu [Wężyk 2014]. W Polsce do generowania stref wykorzystywano się do tej pory dwa rodzaje NMT – do roku 2013 był to fotogrametryczny NMTLPIS o dokładności pionowej rzędu 1,5 metra [Czekalski i in. 2006], po roku 2013 udostępniony został model NMTISOK – opracowany za pomocą Lotniczego Skanowania Laserowego – o znacznie lepszej dokładności pionowej wynoszącej mniej niż 0,15 metra [Wężyk 2014].

Podstawowym celem artykułu jest zbadanie, w jakim stopniu dokładność NMT, przy założeniu tożsamości wszelkich innych danych i parametrów modelowania, może wpłynąć na zasięg strefy zalewowej i w wyniku tego na decyzje dotyczące ochrony przeciwpowodziowej. Cel ten został zrealizowany za pomocą analiz przestrzennych stref wygenerowanych w oparciu o modele hydrauliczne zbudowane na podstawie danych z NMT LPIS oraz NMT ISOK.

Dodatkowo, w przypadku strefy o z założenia gorszej dokładności (wygenerowanej na podstawie NMT LPIS) przeprowadzono postępowanie uwzględniające wpływ błędów NMT – tzw. metodę miękka oraz metodę Monte Carlo [Hejmanowska 2006], następnie przeanalizowano użyteczność zastosowania tych narzędzi pod kątem ich wpływu na ograniczenie błędów i niepewności przy szacowaniu wielkości zagrożenia powodziowego.

MATERIAŁY I METODY

Obszar analizy

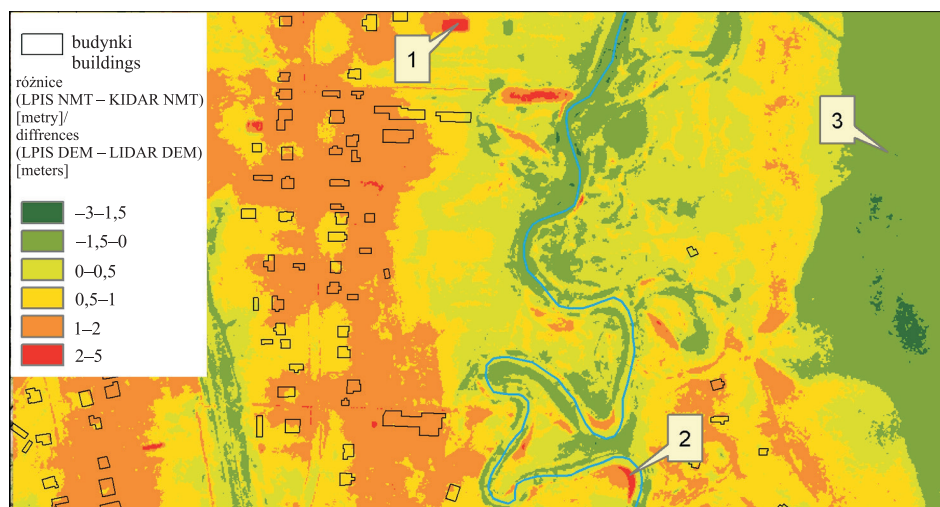
Obszarem testowym był fragment doliny rzeki Warty o długości 3,3 km, w km 748+400 do km 751+700, położony poniżej zbiornika Poraj. Wybór tego obszaru uzasadniony został dostępnością danych i opracowań. Dodatkowo, na obszarze analizy istnieje

potwierdzone zagrożenie powodziowe oraz obowiązuje koncepcja budowy obwałowania, mającego na celu organicznie tego zagrożenia [BCE Kraków... 2012].

Porównanie NMT

Dokładność NMT ISOK na obszarze badań została zweryfikowana na podstawie pomiarów geodezyjnych wykonanych w roku 2012. Jako punkty referencyjne przyjęto punkty osnowy geodezyjnej – liczba punktów wykorzystana w analizach wyniosła 35, były to punkty zlokalizowane w odległości około 50 metrów od koryta rzeki. Punkty zostały zmierzone za pomocą odbiornika GPS, pomiary poddano korekcji w oparciu o poprawki z sieci stacji ASG-EUPOS. Rezultatem analiz była wielkość błędu wynosząca średnio 14 cm (przy dokładności pomiaru rzędu 5 cm). Przyjęto więc, że NMT opracowany na potrzeby ISOK będzie dla obszaru analizy modelem wzorcowym.

Analizy błędu NMT LPIS dokonano za pomocą algebry map, tj. odejmowania wartości pikseli rastra NMT ISOK od wartości pikseli NMT LPIS. Wartości różnicy tego odejmowania przyjęto jako wartości błędu NMT LPIS. Średnia wartość tego błędu na obszarze analizy wyniosła 72 cm. Maksymalna wartość błędu wyniosła 462 cm, a odchylenie standardowe 58 cm. Wartości skrajne spowodowane były między innymi momentem czasowym powstania omawianych modeli terenu (LPIS 2007, ISOK 2014) i związanymi z tym efektami działania erozji rzecznej oraz pracami ziemnymi, jakie prowadzono na obszarze opracowania (ryc. 1). Największe błędy o wartości minusowej zlokalizowane były na obszarach lasu; spowodowane mogą one być metodyką opracowywania danych LPIS, gdzie lasy są tzw. obszarami wyłączonymi, co zazwyczaj wiąże się z dużym błędem wysokości na tych obszarach [Czekalski i in. 2006]. Średnia wartość błędu wynosząca około 70 cm może być spowodowana porastającą większość obszaru analizy wysoką roślinnością trawiastą.



Ryc. 1. Różnice w modelach terenu na obszarze analizy, 1 – wykopcy, 2 – działalność erozyjna rzeki, 3 – las

Fig. 1. Differences between digital elevation models in the study area, 1 – excavations, 2 – river erosion, 3 – forest

Modelowanie i analizy przestrzenne

Dla testowanego odcinka rzeki opracowano dwa modele jednowymiarowe w programie DHI Mike11. Modele różniły się od siebie wykorzystanymi NMT jako danymi wejściowymi, pozostałe parametry były identyczne dla obydwu modeli. Model jednowymiarowy składał się z 12 przekrojów dolinowych (1 przekrój na 150 metrów), punkty przekrojów korytowych zostały pomierzone geodezyjnie w terenie i następnie przedłużono je o wartości rzędnych z numerycznych modeli terenu, tak aby przekroje poprzeczne obejmowały swoim zasięgiem całą terasę zalewową. Za warunek ujściowy przyjęto relację pomiędzy przepływem a zwierciadłem wody na przekroju ujściowym. Współczynniki szorstkości nadano na podstawie warstwy pokrycia terenu z Bazy Danych Obiektów Topograficznych. Jako warunki brzegowe przyjęto: na pierwszym przekroju stały przepływ o wielkości $81,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz warunek skupiony punktowy odpowiadający dopływowi na obszarze modelu, o stałym przepływie wynoszącym $14,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości te odpowiadały wartościom przepływu maksymalnego dla wody o prawdopodobieństwie przewyższenia wynoszącym 1% [BCE Kraków... 2012].

Model hydrauliczny wygenerowany na podstawie NMT ISOK skalibrowano, dobierając wartości współczynnika szorstkości, w oparciu o zasięg strefy zalewowej o prawdopodobieństwie 1% opracowanej w ramach programu ISOK (www.powodz.gov.pl). Uzyskano pełną zgodność w zakresie generowanego przez strefy zagrożenia powodziowego (taką samą liczbę zagrożonych przez powódź budynków). Skalibrowany model hydrauliczny opracowany na podstawie NMT ISOK i strefę wygenerowaną na podstawie jego wyników traktowano następnie jako dane referencyjne dla modelu/strefy wygenerowanej w oparciu o NMT LPIS.

Wpływ błędów NMT LPIS na wyniki modelowania zbadany został za pomocą analizy wyników przeprowadzonych symulacji jednowymiarowych. Wyniki modeli w postaci rzędnych zwierciadła wody zostały ze sobą porównane. Na podstawie wyników modelowania wygenerowano Numeryczne Modele Powierzchni Wody (NMPW), interpolując powierzchnię wody na podstawie wartości rzędnej w przekrojach obliczeniowych. Następnie wygenerowano strefy zalewowe, posługując się algebrą map, tj. odejmowaniem wartości rzędnych NMT od wartości NMPW. Konsekwentnie dokonano odejmowania w parach NMT LPIS – NMPW na podstawie NMT LPIS oraz NMT ISOK – NMPW wygenerowany na podstawie modelu ISOK. Następnie przeanalizowano, w jakim stopniu badany parametr modelowania wpłynął na zasięgi zalewów oraz statystyki dotyczące wielkości zagrożenia powodziowego. Efektem analiz było określenie zagrożenia powodziowego dla analizowanych stref.

W przypadku strefy obciążonej większym błędem, wygenerowanej na podstawie NMT LPIS, użyto procedur uwzględniających błąd NMT w generowaniu strefy – tj. metody Monte Carlo oraz metody miękkiej.

Metoda miękka polegała na przyjęciu założenia o jednorodnym przestrzennie błędzie NMT – o wysokości 0,7 metra i wygenerowaniu strefy z dodaniem powyższej wartości błędu do rzędnej zwierciadła wody [Hejmanowska 2006].

Drugą metodą ograniczenia niepewności przy wyznaczaniu strefy jest metoda Monte Carlo, pozwalająca na uzyskanie przestrzennego rozkładu prawdopodobieństwa danego zdarzenia [Lunberg 2000, Hejmanowska 2006, Smemoe i in. 2007]. Do obliczenia praw-

dopodobieństwa zdarzenia polegającego na zalaniu pikseli terenu wykorzystano 100 map przedstawiających losowy rozkład błędu NMT wygenerowany w oparciu o parametry błędu dla modelu LPIS na obszarze analizy, tj. średnia = 0,72 m, odchylenie standardowe = 0,58 m, rozkład normalny. W następnym kroku dokonano 100 odejmowania – od rastra NMT LPIS odejmowano kolejne losowe rastry błędu. Dla uzyskanych 100 rastrow zawierających informację o rzędnej NMT LPIS wraz z uwzględnieniem losowej wartości błędu wyznaczono następnie 100 stref zalewowych. Poszczególne strefy połączono finalnie w jedną mapę przedstawiającą prawdopodobieństwo zalania danego obszaru, z uwzględnieniem losowego rozkładu błędu NMT, o parametrach takich jak błąd NMT LPIS na obszarze analizy.

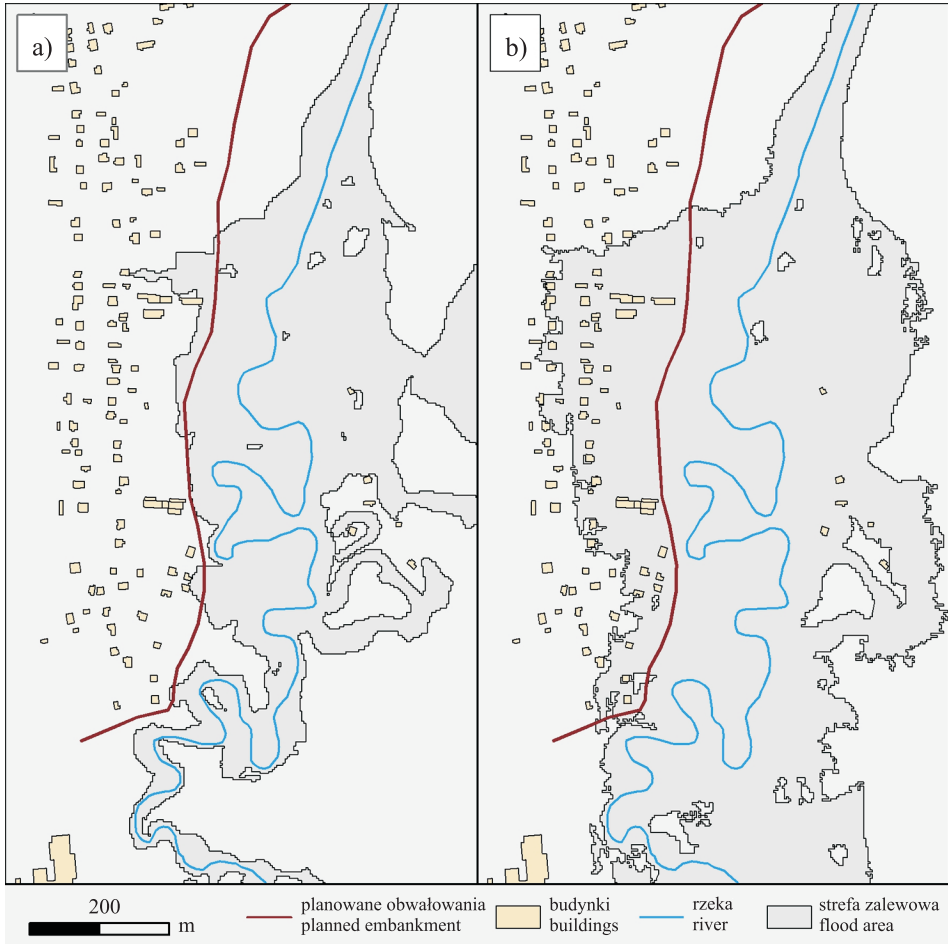
WYNIKI

Dla modeli jednowymiarowych średnia wartość różnicy zwierciadła wody (LPIS – ISOK) kształtowała się na poziomie 34 cm, a odchylenie standardowe na poziomie 25 cm. Maksymalna wartość różnicy wyniosła 75 cm, a więc minimalnie więcej niż średnia wartość różnicy NMT na obszarze analizy. Na odcinku ujściowym rzędne zwierciadła wody były identyczne, co wynikało stąd, iż był to odcinek obwałowany, gdzie geometria przekroju poprzecznego w całości wygenerowana była na podstawie pomiarów geodezyjnych, a nie NMT.

Powierzchnia stref zalewowych wynosiła odpowiednio 35 ha dla LPIS i 62 ha dla ISOK. W zależności od zastosowanego modelu terenu zalewanych było 3 (LPIS) albo 34 (ISOK) budynki mieszkalne. W przypadku modelu ISOK zagrożone budynki tworzyły skupienie przestrzenne – 90% znajdowało się na obszarze o powierzchni około 10 ha, który ma być chroniony przez planowane obwałowanie przeciwpowodziowe [BCE Kraków...2012].

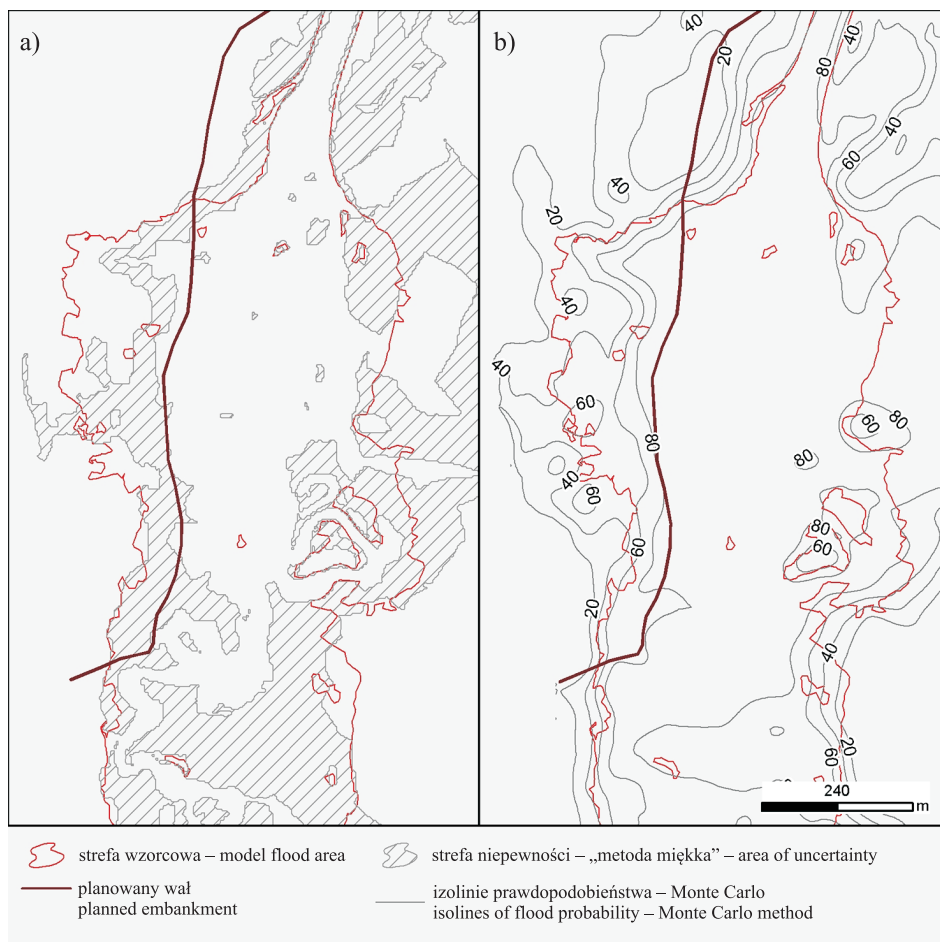
Po zastosowaniu metody miękkiej zasięg strefy zalewowej zwiększył się ponad dwukrotnie – do 77 ha (powierzchnia strefy wzorcowej wynosiła 62 ha); zwiększeniu uległo również zagrożenie powodziowe – zalanych zostało w sumie 19 budynków mieszkalnych, jednak w dalszym ciągu zagrożenie było znacząco mniejsze niż w przypadku strefy wzorcowej.

Po zastosowaniu metody Monte Carlo uzyskaliśmy mapę prawdopodobieństwa. Cały kluczowy obszar zalewany znajdował się w obrębie strefy o prawdopodobieństwie zalania większym niż 0 – wynosiło ono od 0,2 do 0,8. Wszystkie budynki zalewane w strefie wzorcowej, a nie zalewane w strefie LPIS znajdowały się w zasięgu prawdopodobieństwa, średnia prawdopodobieństwa zalania tych budynków wynosiła 0,53. Strefa wraz z obszarem niepewności będąca wynikiem metody miękkiej oraz mapa prawdopodobieństwa, będąca rezultatem metody Monte Carlo, zostały zamieszczone na ryc. 3.



Ryc. 2. Strefy zalewowe, zagrożenie powodziowe i planowane działania: a – NMT LPIS, b – NMT ISOK

Fig. 2. Flooded areas and planned embankment: a – LPIS DEM, b – ISOK DEM



Ryc. 3. Strefa niepewności (a) oraz mapa prawdopodobieństwa (b)
 Fig. 3. Zone of uncertainty (a) and probability of flooding maps (b)

DYSKUSJA

Błąd modelu LPIS doprowadził do znacznych różnic pomiędzy zasięgiem strefy zalewowej wygenerowanej w oparciu o model LPIS a zasięgiem wzorcowym. Znaczne różnice w zasięgach stref przełożyły się na bardzo duże rozbieżności w określeniu zagrożenia powodziowego (11 razy więcej zalewanych budynków mieszkalnych w przypadku ISOK). Tak duże różnice w określanym zagrożeniu powodziowym spowodowane były m.in. przez strukturę przestrzenną błędu NMT LPIS – czyli występowanie zwartych obszarów błędu modelu o wyraźnie dodatniej albo ujemnej wartości. Rezultatem tego zjawiska był niewielki wpływ metody uwzględnienia średniej wartości błędu na niedoszacowanie zagrożenia powodziowego, gdyż w przypadku powyższego obszaru analizy,

kluczowe z punktu widzenia zagrożenia powodziowego budynki znajdują się na obszarze o wielkości błędu NMT większej, niż średnia błędu na obszarze opracowania.

Z powyższego powodu wartościowa wydaje się być metoda Monte Carlo, która bierze pod uwagę wszelkie możliwe konfiguracje przestrzennego rozkładu błędu, przy założeniu statystycznych parametrów błędu (np. średniej, odchylenia standardowego). W przypadku niniejszego artykułu powyższe parametry pozyskano z samego obszaru badań, opierając się m.in. na geodezyjnych danych referencyjnych, lecz można w tym celu z podobnym efektem zastosować ogólne parametry błędu dla danego NMT [Lundberg 2000, Smemone 2007].

PODSUMOWANIE

Błąd pionowy NMT LPIS wynoszący według założeń metodycznych [Czekalski i in. 2006] 1,5 metra, a na obszarze badań średnio 0,7 metra doprowadził do niewłaściwego oszacowania zagrożenia powodziowego i mógł skutkować podjęciem nietrafionej decyzji dotyczącej lokalizacji działania przeciwpowodziowego.

Zastosowana metoda uwzględnienia średniej wartości błędu, pomimo znaczonego powiększenia areалу strefy, w dalszym ciągu pozostawiła znaczne niedoszacowanie istniejącego zagrożenia powodziowego.

Statystyczna metoda Monte Carlo, uwzględniająca losowy rozkład błędu, umożliwiła przedstawienie prawdopodobieństwa zalania obszaru, co ograniczyło ryzyko związane z niedoszacowaniem zagrożenia powodziowego. Metoda Monte Carlo może być pomocna w przypadku wyznaczania stref w oparciu o dane naznaczone błędem, zwłaszcza w przypadku braku możliwości lub nieopłacalności pozyskania danych referencyjnych.

PIŚMIENNICTWO

- BCE Kraków Sp.z.o.o. (2012). Zabezpieczenie przeciwpowodziowe doliny Warty w km 748+400-763+500 poprzez odcinkową regulację rzeki wraz z obwałowaniem na terenie gmin: Poczesna, Kamienica Polska, Poraj, pow. częstochowski i myszkowski, woj. śląskie.
- Czekalski, T., Gotlib, D., Iwaniak, A., Jaroszek, R., Morańda, M., Olszewski, R., Ostrowski, W., Stankiewicz, M., Wieczorek, T., Wilczyński, T. (2006). Budowa Krajowej Infrastruktury Danych Przestrzennych W Polsce – harmonizacja Baz Danych Referencyjnych, http://www.geoforum.pl/upload/files/site_catalog_text/2532_SDI.pdf.
- Hejmanowska, B. (2006). Wpływ jakości danych na modelowanie stref zagrożenia powodziowego. *Rocz. Geometriki*, 4(1), 146–150.
- Kęsy, R., Włodarczyk, A. (2014). Główne założenia metodyk dotyczących opracowania map zagrożenia powodziowego, http://www.kzgw.gov.pl/files/file/Wiadomosci/Metodyki_MZP_KH_.pdf.
- Lin, B., Wicks, J.M., Falconer, R.A., Adams, K. (2006). Integrating 1D and 2D hydrodynamic models for flood simulation. *Water Manag.*, 159(1), 19–25, <http://www.atypon-link.com/TELF/doi/pdf/10.1680/wama.2006.159.1.19>.
- Lundberg, C. (2000). Estimation of Uncertainty in Flood Analysis. III Agil. Conf. Geogr. Inf. Sci., 104–110, http://plone.itc.nl/agile_old/Conference/2000-helsinki/39.pdf.
- Radoń, R., Piórecki, M. (2012). Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego w aglomeracjach miejskich. *Ogólnokrajowe Sympozjum „Hydrotechnika XIV”*, Ustroń, RZGW Kraków, 1–13.

Smemoe, C.M., Nelson, E.J., Zundel, A.K., Miller, A.W. (2007). Demonstrating floodplain uncertainty using flood probability maps. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 43(2), 359–371.

Wężyk, P. (2014). Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR. Warszawa.

IMPACT OF ERRORS OF DIGITAL ELEVATION MODEL FOR ASSESSMENT OF FLOOD HAZARD, BASED ON HYDRAULIC MODELING

Abstract. The main objective of this paper was to investigate how the errors of the Digital Elevation Model (DEM) can affect the results of the hydraulic modeling. We investigated the impact of DEM on the flood areas and flood depths, which from the point of view of the stakeholders who make decisions concerning the flood protection are crucial. The second objective of this paper was evaluation of methods of limiting the flood risk assessment uncertainty caused by the DEM errors. DEM developed within the ISOK project and DEM developed within the LPIS project were studied.

In order to meet the objectives, we conducted analyses of the DEM errors in the test area of the Warta river section. In the next step, hydraulic, one-dimensional models were developed in DHI Mike 11 software, based on the two DEMs. Based on these hydraulic models results (water levels), the floodplains were delineated. Reaches and water depths of the floodplains were analyzed in order to find out, how the errors of the studied DEMs affect assessed flood risk. In the case of the less accurate LPIS DEM, two methods of managing the DEM error- based uncertainty were adopted: the method assuming an uniform distribution of DEM error and the Monte Carlo method.

The results show that the error of the LPIS DEM (which was about 0,7 meter in the study area) may lead to the underestimation of the flood risk and thus to a wrong decision concerning the location of the flood protection actions. The method assuming an uniform distribution of error does not limit this hazard enough, while the Monte Carlo method allows to manage the flood risk due to the construction of the flood probability map.

Keywords: flood areas, flooding, hydraulic modeling, DEM, data error, uncertainty, Monte Carlo

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2016

Do cytowań – For citation: Szwańgrzyk, M., Ślizewski, B., Kramarczyk, M., Szczyński, M., Adamaszek, P. (2016). Wpływ błędów numerycznego modelu terenu na ocenę zagrożenia powodziowego, w oparciu o modelowanie hydrauliczne. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(4), 321–329.