

Dorota Mirosław-Świątek¹, Mateusz Szcześniak¹

ZASTOSOWANIE AUTOMATYCZNEGO SYSTEMU MONITORINGU POŁOŻENIA ZWIERCIADŁA WODY DO WYZNACZANIA ZASIĘGU ZALEWÓW NA OBSZARZE BASENU DOLNEGO BIEBRZY

Streszczenie: W artykule przeanalizowano możliwość zastosowania danych, pochodzących z automatycznego systemu monitoringu położenia zwierciadła wody w Basenie Dolnej Biebrzy, do wyznaczenia zasięgów zalewów. W analizach wykorzystano dane zarejestrowane przez automatyczne czujniki typu Mini-Diver w latach 2006–2010. Dla sześciu położen zwierciadła wody zarejestrowanych w czasie wezbrań w latach 2006–2010, opracowano przy użyciu programu ArcMap oraz narzędzia Topo to Raster należących do pakietu ArcGis Desktop 10, mapy przedstawiające zasięgi zalewów. Rezultaty porównano z modelami zasięgu zalewów opracowanymi na podstawie pomiarów wykonanych punktowo z łódki na odcinku Osowiec – Burzyn przy zastosowaniu techniki różnicowego GPS w trybie RTK. W celu poprawy jakości analiz dane pochodzące z Mini-Diverów oraz pomiarów punktowych GPS RTK zostały liniowo interpolowane do lokalizacji przekrojów obliczeniowych wykorzystywanych w jednowymiarowym modelu transformacji fal wezbraniowych na obszarze Basenu Dolnego Biebrzy.

Słowa kluczowe: automatyczny rejestrator położenia zwierciadła wody – Diver, Basen Dolnej Biebrzy, GIS, zasięg zalewu.

WSTĘP

Pradolina Biebrzy jest obszarem niezwykle cennym pod względem przyrodniczym. Basen Dolny Biebrzy, uznawany za jej najbardziej naturalną i najmniej przekształconą część, jest miejscem występowania wielu unikalnych ekosystemów mokradłowych [Okruszko, 1991], a występujące tu coroczne zalewy są istotnym czynnikiem kształtującym specyficzne warunki siedliskowe wpływające na unikatowy charakter tego terenu [Banuszuk, 2004]. Ekosystemy te charakteryzują się dużą różnorodnością biologiczną oraz spełniają ważne funkcje środowiskowe, takie jak udział w procesach obiegu, retencjonowania oraz oczyszczania wody. Istnienie licznie występujących w basenie dolnym siedlisk fluwiogenicznych jest nierozdzielnie związane z występowaniem wezbrań i zalewów rzeki Biebrzy, a ich stan uzależniony jest głównie od warunków zasilania wodami wezbraniowymi. Możliwość występowania na tych terenach określonego typu roślin-

¹ Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, e-mail: dorotams@levis.sggw.pl

ności bagiennej związana jest z występowaniem na danym obszarze corocznych wezbrań o określonym czasie trwania i głębokości. Występuje silny związek pomiędzy roślinnością, a warunkami hydrologicznymi sprzyjającymi jej rozwojowi. Najważniejsze charakterystyki warunkujące wzrost i rozwój roślinności [Oświt 1991, Zalewski i in. 1997] to przede wszystkim zasięg zalewu, średnia głębokość zalewu i częstotliwości występowania oraz długości trwania zalewów. Istnieje zatem zapotrzebowanie na opracowywanie metod niezbędnych do określania tych charakterystyk. Jedną z możliwości jest na podstawie znajomości położenia zwierciadła wody opracowanie mapy zasięgu zalewu, a następnie na jej podstawie szacowanie pozostałych charakterystyk hydrologicznych zalewu. W tym celu wykorzystuje się narzędzia informatyczne ze środowiska Systemów Informacji Przestrzennej (GIS), w których na podstawie znajomości położenia zwierciadła wody w korycie rzeki generowany jest Numeryczny Model Zwierciadła Wody (NMZW), a następnie w wyniku wykorzystania Numerycznego Modelu Terenu (NMT) opracowywana jest warstwa zasięgu zalewu. Tego typu podejście szeroko stosowane jest w interpretacji wyników jednowymiarowych modeli transformacji fali wezbraniowej [Mirośław-Świątek i in., 2007; Horrit i Bates, 2002]. W tym przypadku symulowane położenie zwierciadła wody w przekrojach obliczeniowych jest „rozlewane” za pomocą technik GIS i NMT w dolinę zalewową. Przy takim podejściu przyjmowane jest założenie, że w warunkach zalewu, gradient położenia zwierciadła wody w kierunku poprzecznym do rzeki jest zaniedbywalny. Pomiaru wykonywane na terenach zalewowych w Basenie Dolnym Biebrzy potwierdzają to założenie [Chormański, 2003]. W celu identyfikacji i weryfikacji jednowymiarowego modelu hydrodynamicznego transformacji fali wezbraniowej w Basenie Dolnym Biebrzy [Mirośław-Świątek, 2012] została opracowana i zainstalowana sieć automatycznych czujników pomiarowych, rejestrujących położenie zwierciadła wody zarówno w korycie rzeki jak i na terenach zalewowych [Mirośław-Świątek i Utratna, 2012]. W poniższym artykule przeanalizowano możliwość wykorzystania zarejestrowanych danych do określania zasięgu zalewów w Basenie Dolnym Biebrzy. Dla zarejestrowanych przez automatyczne czujniki pomiarowe typu Mini-Diver[®], model DI501 [Eijkelkamp, 2007] rzędnych położenia zwierciadła wody opracowano przy użyciu programu ArcMap [ESRI, 2010] modele zasięgu zalewów. Rezultaty porównano z modelami zasięgu zalewów opracowanymi na podstawie pomiarów wykonanych w terenie, za pomocą łódki na odcinku Osowiec – Burzyn przy zastosowaniu techniki różnicowego GPS w trybie RTK. Analizy przeprowadzono dla sześciu pomiarów wykonanych w następujących terminach: 18 kwietnia 2006, 23 marca 2007, 8 marca 2008, 8 kwietnia 2009, 7 kwietnia 2010 oraz 8 czerwca 2010.

METODY

Zasięgi zalewów zostały wyznaczone dla położenia zwierciadła wody zarejestrowanego przez 8 Mini-Diverów oraz pomierzonego punktowo z łódki (technika różnicowego GPS w trybie RTK) przy użyciu programu ArcMap oraz narzędzia Topo to Raster, należących do pakietu ArcGis Desktop 10. Funkcja Topo to Raster

wykorzystuje procedurę interpolacyjną opartą na algorytmie ANUDEM [Hutchinson 1989] i jest połączeniem metody interpolacyjnej krzywych sklepanych wraz z metodą odwrotnych odległości. Metody te stosowane są zamiennie, zależnie od charakteru wykorzystanych danych pomiarowych (ESRI 2010).

W celu poprawy jakości analiz dane pochodzące z Mini-Diverów oraz pomiarów punktowych GPS RTK zostały liniowo interpolowane do lokalizacji 72 przekrojów obliczeniowych [Miroslaw-Świątek, 2012] wykorzystywanych w jednowymiarowym modelu transformacji fal wezbraniowych na obszarze Basenu Dolnego Biebrzy. Przekroje te zostały wykorzystane w funkcji Topo to Raster jako izolinie o znanej rzędnej położenia zwierciadła wody. W wyniku zastosowania tej funkcji otrzymano Numeryczny Model Zwierciadła Wody, zawierający rzędne położenia zwierciadła wody. Różnica Numerycznego Modelu Zwierciadła Wody i Numerycznego Modelu Terenu Basenu Dolnego Biebrzy określa mapę zasięgu obszarów zalanych, wskazując wszystkie miejsca, gdzie zwierciadło wody znajduje się powyżej terenu. W analizach wykorzystano NMT, który charakteryzuje się błędem średnim kwadratowym o wartości nieprzekraczającej 0,35 m [Chormański, 2003].

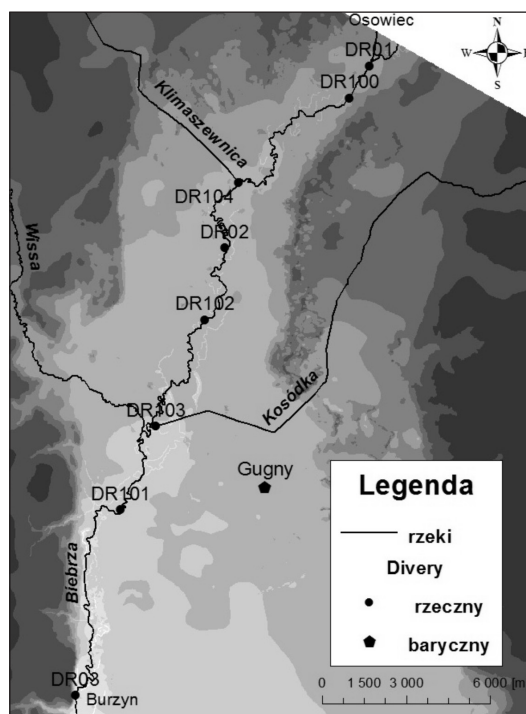
OBSZAR BADAŃ

Dolina Biebrzy jest położona w północno-wschodniej części Polski. Długość południowego basenu wynosi 30 km, a szerokość waha się od 12 do 15 km. Największą powierzchnię na tym terenie zajmuje taras zalewowy, który obejmuje płaskie, rozległe torfowiska oraz nieznacznie sfalowaną mułową strefę przykorytową o szerokości do 1 – 2 km [Żurek, 1991]. Koryto rzeki na tym odcinku ma kręty przebieg, tworzy liczne meandry, boczne odnogi i starorzecza, przez które woda przepływa podczas wezbrań. Szerokość koryta waha się od około 20 do 35 m. Koryto jest wyraźnie wyodrębnione, a w południowej części, w rejonie ujścia do Narwi, mocno wcięte w dno doliny. Najważniejsze dopływy Biebrzy w dolnym odcinku to prawobrzeżna Klimaszewnica i Wissa oraz lewobrzeżna Kosódka. Dolina Dolnej Biebrzy ma charakterystyczny strefowy układ zbiorowisk roślinnych, który w pełni odzwierciedla warunki wodne panujące na analizowanym terenie. Zgodnie z wcześniejszym rozpoznaniem, Oświt [1991] wyróżnia pięć stref roślinnych: zbiorowiska szuwarowe Phragmition, zbiorowiska szuwarów turzycowych Magnocaricion, zbiorowiska turzycowo-mszyste Scheuchzeria caricetea fuscae, zakrzewienia wierzb i brzozy oraz zbiorowiska lasów olchowych i brzozowo-olchowych Alnetea glutinosae.

AUTOMATYCZNY SYSTEM MONITORINGU POŁOŻENIA ZWIERCIADŁA WODY W BASENIE DOLNYM BIEBRZY

Automatyczny system monitoringu położenia zwierciadła wody w Basenie Dolnym Biebrzy składa się z 27 czujników zainstalowanych w korycie rzeki (monitoring rzeczny) i czujników zlokalizowanych na terenach zalewowych (monitoring

zalewowy). Czujniki pomiarowe (Divery) to urządzenia Mini-Diver[®], model DI501 [Eijkelkamp, 2007]. Służą one do rejestracji temperatury (w zakresie od -20 do +80 °C – z dokładnością do 0,1 °C) oraz ciśnienia wody gruntowej. Divery, instalowane były na przestrzeni lat 2005-2008. W wrześniu 2005 zostało zainstalowanych 5 Diverów rzecznych w następujących lokalizacjach w korycie rzeki: DR100-Pale km 48+688, DR104-Klimaszewnica km 40+499, DR102-Okrasin km 31+644, DR103-Kosódka km 24+195, DR101-Chyliny km 18+280. W 2008 roku rozszerzono istniejącą sieć pomiarową o 22 automatyczne rejestratory położenia zwierciadła wody, z których 3 (DR01, DR02, DR03) zostały zainstalowane w korycie rzeki w następujących lokalizacjach: km 50+192, km 35+691, km 8+334. Aktualnie monitoring rzeczny składa się z 8 czujników, których lokalizacja została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Lokalizacja Mini-Diverów w korycie rzeki na obszarze Basenu Dolnego Biebrzy

Dane pochodzące z tych urządzeń zostały wykorzystane w analizie zasięgu zalewów. Cały system monitorujący położenie zwierciadła wody w korycie rzeki oraz terenach zalewowych został szczegółowo omówiony w pracy Mirosław-Świątek i Utratna [2012]. Mini-Diver baryczny zlokalizowany jest w wsi Gugny. Czujniki gromadzą dane w wewnętrznej pamięci z 3 lub 6 godzinnym krokiem czasowym. Urządzenia są czytywane w terenie raz do roku w okresie letnim lub wczesno jesiennym, kiedy woda ustępuje z zalewów. Mini-Divery rzeczne zainstalowane w roku 2005 są czytywane

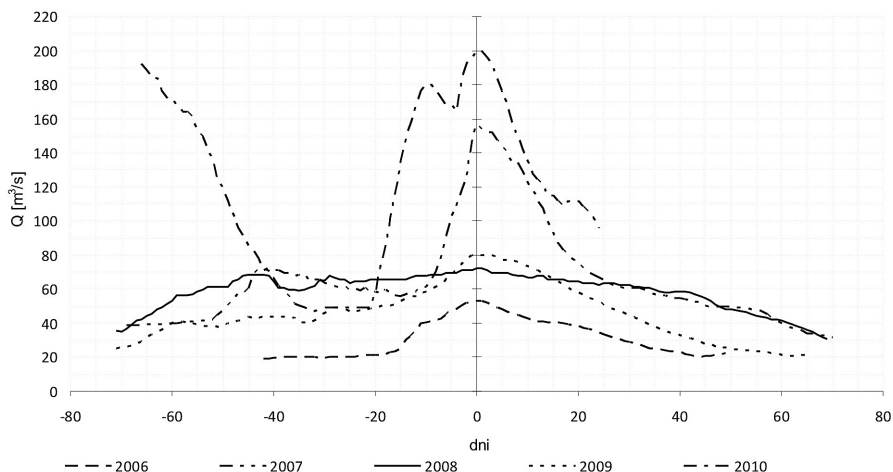
były corocznie do roku 2009. Pozostałe czujniki zainstalowane w korycie rzeki oraz na terenach zalewowych szcztane zostały w czerwcu 2009. Niestety utrzymujące się wysokie stany wody zarówno w korycie rzeki i na terenach zalewowych uniemożliwiły zebranie danych w roku 2010 oraz 2011. Zarówno w roku 2010 jak i 2011 możliwe było dotarcie jedynie do 3 urządzeń zainstalowanych w korycie.

CHARAKTERYSTYKA ZALEWÓW W BASENIE DOLNYM BIEBRZY W OKRESIE 2006–2010

Analizowane w niniejszej pracy wysokości zwierciadeł wody pochodzą z sześciu zalewów w Basenie Dolnym Biebrzy, zarejestrowanych w dniach: 18.04.2006, 23.03.2007, 8.03.2008, 8.04.2009, 7.04.2010 oraz 8.06.2010. Na podstawie krzywej przepływu w Burzynie przyjmuje się, że zalewy w Basenie Dolnym Biebrzy występują, gdy wartość przepływu dla tego wodowskazu przekracza $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Najmniejszy pod względem wartości przepływu i czasu trwania był zalew z kwietnia w roku 2006 (rys. 2). Największy zalew wystąpił w roku 2010, niestety brak jest danych dla całego okresu występowania wysokich stanów wód w tym roku. Drugi pod względem wielkości był zalew z marca 2007 roku.

Analiza zasięgu zalewów

W celu sprawdzenia możliwości stosowania zarejestrowanych rzędnych położenia zwierciadła wody przez Divery do interpolacji położenia zwierciadła wody w rzece w Basenie Dolnym Biebrzy, a tym samym do wykorzystania tych danych do opraco-

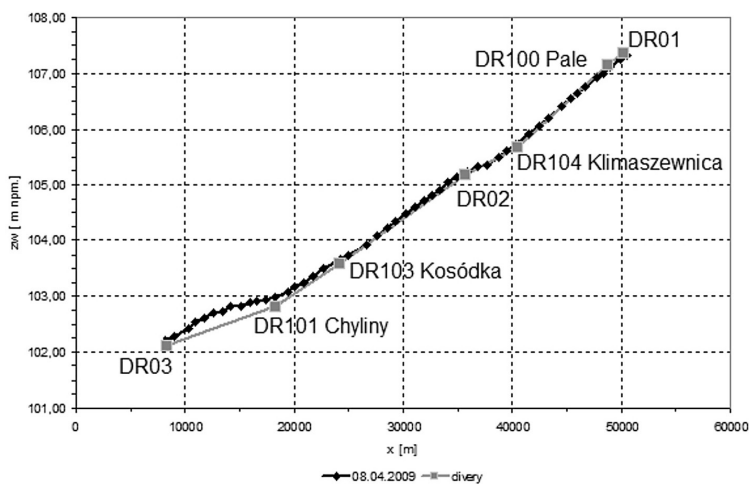


Rys. 2. Hydrogramy przepływu dla wodowskazu Burzyny w trakcie wezbrań w latach 2006–2010

wywnania map zasięgu zalewów, porównano wskazania Mini-Diverów rzecznych z jednokrotnymi pomiarami rzędnych zwierciadła wody wykonanymi z łódki na odcinku Osowiec – Burzyn przy zastosowaniu techniki różnicowego GPS w trybie RTK. Pomiary wykonywano w trakcie kulminacji wezbrań. Na rysunku 3 przedstawiono położenie zwierciadła wody na odcinku rzeki pomiędzy km 50+192, a km 8+334, które zostało pomierzone za pomocą GPS w dniu 08.04.2009 oraz zarejestrowane przez Diverę DR01-DR03. Obliczone różnice pomiędzy wskazaniem Mini-Diverów, a zmierzonym położeniem zwierciadła wody dla kulminacji wezbrań w okresie 2006–2010 zmieniają się od 0,01 m do 0,15 m (tab. 1). Dokładność pomiaru położenia zwierciadła wody techniką różnicowego GPS w trybie RTK jest rzędu $\pm 0,03$ m [Chormański i in., 2003]. Jednak błąd pomiaru rzędnej zwierciadła wody wykonany ręcznie z łódki może sięgać 0,10 m. Dane zawarte w tabeli 1 wskazują, że pomiary wykonane automatycznymi rejestratorami mieszczą się dla większości urządzeń w granicach tego błędu. Średnia różnica w pomiarach wynosi 0,07 m, co mieści się w zakresie przyjętej dokładności.

Na rysunkach 4–9 przedstawiono opracowane mapy zasięgu zalewów dla wykorzystanych dwóch źródeł danych (pomiary GPS RTK oraz rzędne zwierciadła wody zarejestrowane przez Diverę). Powierzchnie zalewów uzyskanych na podstawie różnych źródeł przedstawiono w tabeli 2.

Maksymalna różnica w powierzchni zalewu nie przekracza 13% i wystąpiła dla wezbrania z 2006. Największe różnice występują dla małych wezbrań (rys. 2, tab. 2). Różnice w zalanej powierzchni dla wezbrań większych nie przekraczają 8%. Jest to związane z dużą „wrażliwością” płaskiej rozległej doliny zalewowej na niewielkie różnice położenia zwierciadła wody dla małego wezbrania, które wystąpiło w 2006



Rys. 3. Położenie zwierciadła pomierzone GPS RTK i zarejestrowane przez Mini-Diverę DR01-DR03 (08.04.2009)

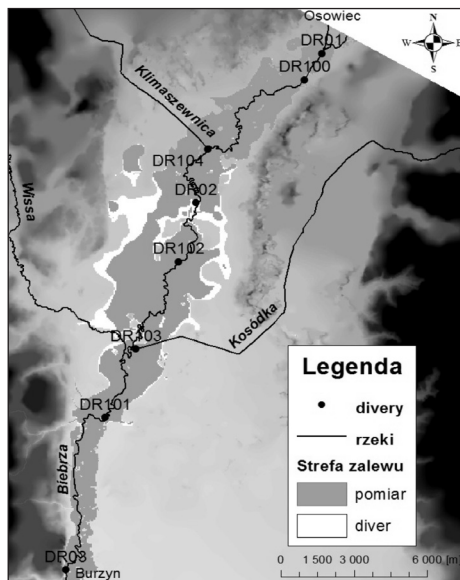
Tabela 1. Różnice pomiędzy wskazaniami Mini-Diverów a pomierzonymi rzędnymi położenia zwierciadła wody (Δz – różnica, d – wskazanie Divera, p – pomiar z łódki)

Nazwa	Lokalizacja	km [m]	$\Delta z = (d-p)$ [m]					
			18.04 2006	23.03 2007	08.03 2008	08.04 2009	07.04 2010	08.06 2010
DR01		50191				0.07		
DR100	Pale	48688	0.03	0.03	0.03	0.08	0.02	-0.07
DR104	Klimaszewnica	40499	0.01	-0.08	-0.14	-0.07		
DR102	Okrasin	31644	0.07	0.07	-0.13		-0.02	-0.03
DR02		35691				-0.03	-0.06	-0.04
DR103	Kosódka	24195	0.07	0.03	-0.10	-0.08		
DR101	Chyliny	18279	-0.02	-0.03	-0.15	-0.13		
DR03		8334				-0.12		-0.03

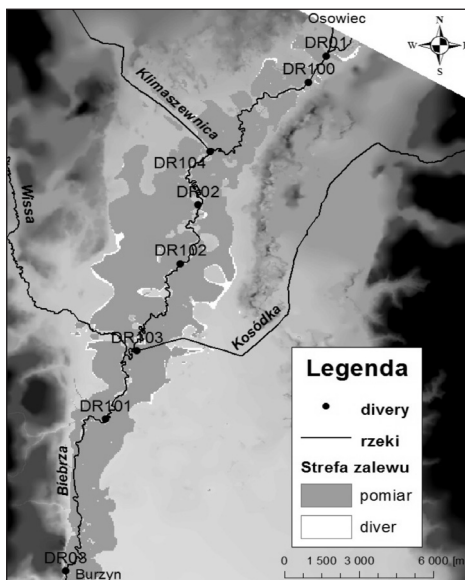
Tabela 2. Obliczone powierzchnie [piksele] zasięgów zalewów

Źródło danych	Data					
	18 IV 2006	23 III 2007	8 III 2008	8 IV 2009	7 IV 2010	8 VI 2010
Divery (d)	26332	30483	26430	26593	33268	33466
Pomiar z łódki (p)	23313	30101	29993	28904	31785	32238
Procentowa różnica między powierzchniami zalewów						
Różnica $(S_d - S_p)/S_p$	13%	1%	-12%	-8%	5%	4%

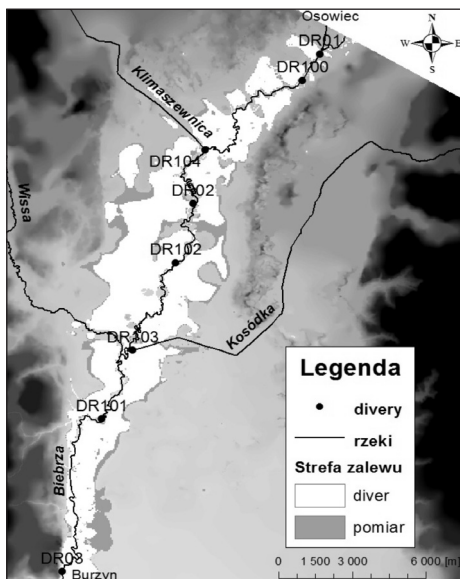
roku. Wraz ze zwiększaniem się wezbrań w kolejnych latach różnice w powierzchni terenów zalanych zdecydowanie maleją i nie przekraczają 5%. Analizując mapy zasięgów wezbrań (rys. 4–9) można zauważyć, że największe rozbieżności występują pomiędzy diverami DR101, a DR03. Są to przypadki, kiedy zasięg zalewu wyznaczony przy użyciu pomiarów z łódki jest większy niż zasięg z interpolacji odczytów diverów. Sytuacja taka szczególnie widoczna jest w czasie występowania dużych zalewów. Przy mniejszym zalewie, jak w roku 2006, różnica ta jest stosunkowo nieduża. W celu poprawy dokładności wyznaczania zasięgu zalewów na podstawie wskazań rejestrowanych przez automatyczne czujniki w obszarze pomiędzy DR101 a DR03 powinien zostać zainstalowany dodatkowy Mini-Diver. Oszacowane różnice w zasięgu zalewów, wykonane zarówno dla małych jak i dużych wezbrań pokazują, że dane pozyskiwane z automatycznego systemu monitoringu położenia zwierciadła wody w Basenie Dolnym Biebrzy mogą być z zadawalającą dokładnością wykorzystywane do analiz zasięgu zalewów w tym obszarze. W dalszych badaniach po zgromadzeniu wystarczającego ciągu danych zostaną opracowane narzędzia statystyczne do prognozy położenia zwierciadła wody w miejscach lokalizacji czujników.



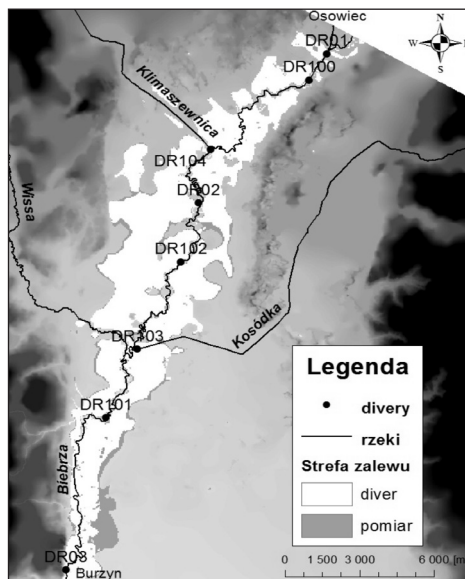
Rys. 4. Zasięg zalewu (18.04.2006)



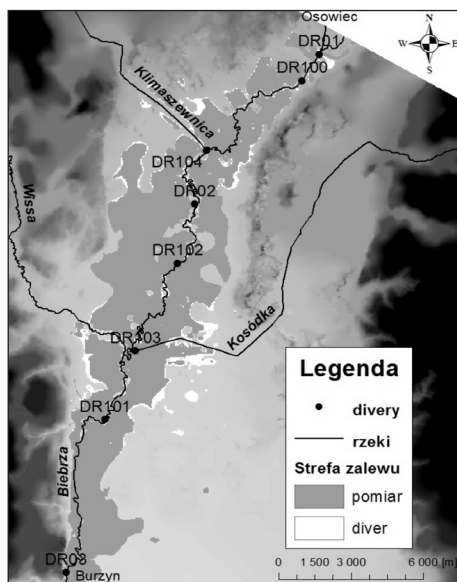
Rys. 5. Zasięg zalewu (23.03.2007)



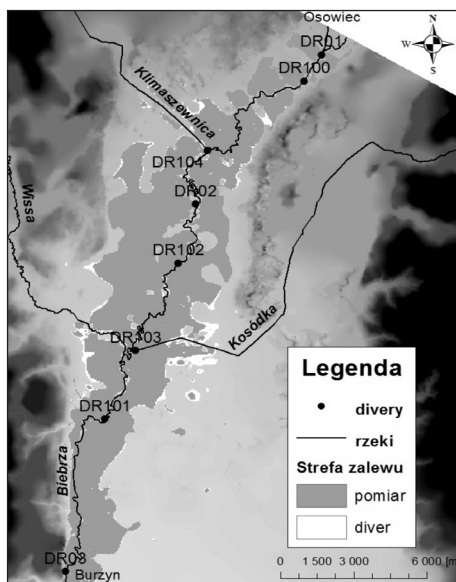
Rys. 6. Zasięg zalewu (08.03.2008)



Rys. 7. Zasięg zalewu (08.04.2009)



Rys. 8. Zasięg zalewu (07.04.2010)



Rys. 9. Zasięg zalewu (08.06.2010)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z analizy pomiarów rzędnych zwierciadła wody za pomocą techniki GPS RTK i rzędnych zarejestrowanych przez automatyczne czujniki wynika, że w celu odtwarzania położenia zwierciadła wody w rzece za pomocą interpolacji liniowej wskazań Mini-Diverów należałoby istniejącą sieć pomiarową rozszerzyć o dodatkowy czujnik zainstalowany 5 km w górę rzeki od czujnika DR03.

Dane pochodzące z automatycznego systemu monitoringu położenia zwierciadła wody mogą być wykorzystane do określenia zasięgu zalewów. Maksymalna różnica między powierzchnią zalewu wyznaczonego na podstawie interpolacji wskazań diverów, a powierzchnią zalewu wyznaczonego na podstawie pomiarów z łódki nie przekraczała 13%. Różnice te są mniejsze w przypadku większych zalewów, które występowały w latach 2007 oraz 2010 i kształtowały się na poziomie od 1 do 5%.

Ze względu na stosowane metody interpolacyjne wyznaczania obszaru zalanego wskazane jest, aby dane pochodzące z monitoringu były interpolowane do przekrojów obliczeniowych, które zlokalizowane są w korycie rzeki oraz na terenach zalewowych.

W celu lepszego określania zasięgu zalewów w basenie dolnym Biebrzy na podstawie automatycznego systemu monitoringu położenia zwierciadła wody należałoby zainstalować dodatkowy czujnik pomiędzy diverami DR101 i DR03. Obecnie czujniki te znajdują się w odległości ok. 10 km od siebie.

LITERATURA

- Banaszuk H. 2004. Kotlina Biebrzańska i Biebrzański Park Narodowy. Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok.
- Chormański J. 2003. Methodology for the flood extent determination in the Lower Biebrza Basin. Ph. D. thesis, Warsaw Agricultural University – SGGW.
- Chormański J., Kowalewski K., Mazippus M. 2003. Application of GPS techniques for water stage measurements and river slope calculation in wetland area of Upper Biebrza; Praca zbiorowa pod redakcją: Ignar S., Nowakowski P., Okruszko T. - Measurements techniques and data assessment in wetlands hydrology.; Wydawnictwa SGGW, Warszawa: 53-60
- ESRI 2010: ArcGIS Desktop Help
- Horritt M.S., Bates P.D. 2002. Evaluation of 1-D and 2-D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268: 87–99.
- Hutchinson M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211–232.
- Mirosław-Świątek D., Chormański J., Michałowski R. 2007. Zastosowanie modelu hydrodynamicznego przepływu wody i techniki GIS do wyznaczania charakterystyk zalewów na obszarze łęgowej doliny rzecznej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, z. 519
- Mirosław-Świątek D., Okruszko T., Kubrak J., Kradel I. 2008. The use of hydrological characteristics for wetland habitats protection in water management of the upper Narew river System In: *Integrated Water Management: Practical Experiences and Case Studies*. Springer pp. 283–293.
- Mirosław-Świątek D. 2012. Unsteady 1D Flow Model of Natural Rivers with Vegetated Floodplain – An Application to Analysis of Influence of Land Use on Flood Wave Propagation in the Lower Biebrza Basin, *Water Resources Management and Modeling*, Purna Nayak (Ed.), InTech.
- Mirosław-Świątek D., Utratna M. 2011. Automatyczny system rejestracji położenia zwierciadła wody na terenach zalewowych w basenie dolnym rzeki Biebrzy *Przegląd Naukowy Inżynierii i Kształtowania Środowiska*, Rocznik XXI (2).
- Okruszko H. 1991. Kształtowanie się naukowego rozpoznania Bagien Biebrzańskich, jako przygotowanie decyzji do postępowania na tych terenach. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 372
- Oświt J. 1991. Roślinność i siedliska zabagnionych dolin rzecznych na tle warunków wodnych, *Rocz. Nauk Rol.*, 221: Wyd. Nauk. PWN, 229.
- Zalewski M., Janauer G.A., Jolankai G. 1997: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. UNESCO IHP Technical Document in Hydrology 7. IHP - V Projects 2.3/2.4, UNESCO Paris, Ecohydrology.
- Żurek S. 1991. Geomorfologia Pradoliny Biebrzy. [W:] *Bagna Biebrzańskie*. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, z. 372.

APPLICATION OF THE AUTOMATIC WATER LEVEL MONITORING SYSTEM TO DETERMINE THE FLOOD EXTENT IN THE LOWER BIEBRZA BASIN

Summary. This article presents possibilities of application of the automatic water level monitoring system to determine the flood extent in the Lower Biebrza Basin. Flood extents were generated with the use of GIS techniques for six water levels measured with an automatic water level monitoring system during floods in the period 2006–2010. Results were compared with flood extents based on the water gauges and field measurements.

Key words: automatic water level sensor – Diver, the Lower Biebrza Basin, GIS, flood extent.