

Zastosowanie wysokorozdzielczych, wielospektralnych zdjęć satelitarnych (VHR) do identyfikacji wybranych form rzeźby równi zalewowej

Piotr Ostrowski¹, Tomasz Falkowski¹



P. Ostrowski



T. Falkowski

The application of Very High Resolution multispectral satellite images (VHR) for the identification of some floodplain landforms. *Prz. Geol.*, 64: 1040–1047.

Abstract. The aim of the work was to estimate the usefulness of Very High Resolution (VHR) multispectral images from the IKONOS-2 satellite to identify landforms in the floodplain area. Studying the nature and distribution of the floodplain landforms allows the identification of natural tendencies in fluvial processes and could be useful for the projects of river valley management. The research was carried out along part of the Podlasie gorge of the Bug River valley. We analyzed the orthophotomap both in natural colours (RGB) and colour-infrared (NRG), with 82-cm ground sample distance (GSD). Based on VHR satellite images, 14 (representing 7 types) landform types have been distinguished. Remote sensing results have been verified in

the field. The investigations have enabled the assessment of the usefulness of the multispectral VHR satellite images for the identification of trends in overbank processes.

Keywords: remote sensing, Very High Resolution (VHR) satellite imagery, floodplain, landforms, fluvial geomorphology

Podstawowym celem badań geologiczno-inżynierskich, prowadzonych na potrzeby budownictwa wodnego czy zagospodarowania dolin rzecznych, jest identyfikacja tendencji rozwojowych współczesnych procesów fluwialnych, szczególnie przebiegających w warunkach zjawisk ekstremalnych (wezbrań). W określaniu morfogenezy powierzchni równi zalewowej, poza sedimentologicznymi badaniami zmian warunków depozycji, istotne znaczenie ma także analiza rzeźby tej powierzchni. W identyfikacji bardzo złożonego ukształtowania współczesnych równin aluwialnych od wielu lat wykorzystuje się metody teledetekcyjne, głównie analizę zdjęć lotniczych. Od 1999 r., kiedy to na orbicie został umieszczony pierwszy komercyjny wysokorozdzielczy system obrazowania satelitarnego, dysponujemy stale zwiększającą się liczbą zobrażeń o rozdzielczości przestrzennej <1 m (VHR – *Very High Resolution*), które można uznać za użyteczne w tego typu badaniach (Falkowski & Ostrowski, 2010, 2012; Wierzbicki i in., 2013). W artykule przedstawiono przykład zastosowania wysokorozdzielczych, wielospektralnych zdjęć satelitarnych do identyfikacji form rzeźby równi zalewowej doliny Bugu na odcinku o dużym stopniu naturalności.

ZDJĘCIA LOTNICZE A WYSOKOROZDZIELCZE, WIELOSPEKTRALNE ZDJĘCIA SATELITARNE (VHR)

W przypadku badań geomorfologicznych czy geologicznych mamy obecnie do dyspozycji bogaty zasób klasycznych zdjęć lotniczych oraz wykonywane od kilkunastu lat cyfrowe fotografie lotnicze i wysokorozdzielcze zobrazenia satelitarne. Obrazy satelitarne w porównaniu do tradycyjnych fotografii lotniczych mają wiele zalet, wskazujących na ich potencjalną użyteczność w badaniach morfogenezy równi zalewowych dużych rzek Niżu Polskiego. Podstawowym atutem tego typu materiałów jest możliwość przedstawienia na jednym zobrazeniu znacznie

większego obszaru niż w przypadku zdjęć lotniczych. Unika się dzięki temu montowania w jeden fotoszkie większej liczby zdjęć i wyrównywania występujących pomiędzy nimi różnic tonalnych, co często powoduje zatarcie wielu szczegółów istotnych w procesie fotointerpretacji (Ciołkosz i in., 1978). Obrazy satelitarne charakteryzują się także wyższą od lotniczych rozdzielczością czasową (zazwyczaj kilka dni dla systemów VHRS – *Very High Resolution Satellites*), czyli parametrem określającym jak często ten sam fragment terenu może zostać zarejestrowany przez czujnik teledetekcyjny (Adamczyk & Będkowski, 2007). Ma to szczególne znaczenie w przypadku badań równi zalewowych, a więc obszarów, które podlegają stosunkowo szybkim zmianom, np. w wyniku wezbrań, tworzenia się zatorów lodowych czy awarii wałów przeciwpowodziowych. Systemy VHRS umożliwiają pozyskiwanie znacznie większej ilości danych niż lotnicze systemy teledetekcyjne, np. poruszający się z prędkością ok. 7,5 km/s satelita IKONOS-2 może w ciągu doby wykonać zdjęcia obszaru o powierzchni 240 000 km² (Digitalglobe, 2016).

Jednym z najważniejszych parametrów określających przydatność interpretacyjną zdjęć teledetekcyjnych jest rozdzielczość przestrzenna (Orych & Walczykowski, 2010). Do końca lat 90. XX w. dostępne dla użytkowników cywilnych zobrazenia satelitarne miały zbyt małą rozdzielczością przestrzenną (rozumianą jako liniowy wymiar fragmentu terenu, który określa jeden piksel obrazu teledetekcyjnego), żeby mogły być wykorzystywane do szczegółowych analiz rzeźby den dolin rzecznych. Nowe możliwości interpretacyjne dają komercyjne wysokorozdzielcze systemy satelitarne (VHRS) pozyskujące fotografie o rozdzielczości przestrzennej <1 m. Ich obrazy w zakresie panchromatycznym (IKONOS-2 – 0,82 m, Quick-Bird 2 – 0,61 m, GeoEye-1 – 0,41 m) pozwalają na generowanie ortofotomap odpowiadających dokładnością mapom w skali 1 : 5000 (Kaczyński & Ewiak, 2006), a ich jakość jest zbliżona do jakości drobnoskalowych fotografii lotni-

¹ Katedra Geoinżynierii, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; piotr_ostrowski@sggw.pl, tomasz_falkowski@sggw.pl.

czych (Kurczyński, 1999). Ważną zaletą zdjęć VHR jest ich znacznie większa niż w przypadku fotografii lotniczych rozdzielczość radiometryczna, definiowana jako liczba poziomów (wartości jasności), na które jest podzielony zakres sygnałów rejestrowany przez system satelitarny (Adamczyk & Będkowski, 2007). Rozdzielczość radiometryczna zdjęć VHR z satelitów takich jak IKONOS-2, QuickBird czy WorldView-2 wynosi 11 bitów, co pozwala na rejestrację obrazu aż w 2048 poziomach jasności przy sześciu bitach (64 poziomach jasności) w przypadku klasycznych zdjęć lotniczych (Kaczyński & Ewiak, 2006; Digitalglobe, 2016). Wartość rozdzielczości radiometrycznej ma wpływ na rozpiętość tonalną obrazów, co ma duże znaczenie w procesie ich interpretacji. Wysoka rozpiętość tonalna pozwala na identyfikację wielu struktur (form rzeźby). Jest to szczególnie trudne na zazwyczaj wielokrotnie przeobrażonej powierzchni równi zalewowej. Mimo wymienionych zalet zdjęć VHR należy pamiętać, że nadal mają one ograniczoną rozdzielczość w porównaniu z powszechnie do niedawna wykonywanymi filmami lotniczymi (Kaczyński & Ewiak, 2006) i wymagają korzystnych warunków meteorologicznych (braku zachmurzenia) podczas ich pozyskiwania.

OBSZAR BADAŃ

Równie zalewowe to fragmenty den dolin rzecznych, w których procesy erozji i depozycji mają najbardziej intensywny charakter. W przypadku dużych rzek Niżu Polskiego są to rozległe obszary (ich szerokość dochodzi niekiedy do kilku kilometrów) o niewielkich deniwelacjach i skomplikowanej rzeźbie, będącej wynikiem naturalnej ewolucji strefy korytovej oraz wielokrotnych przepływów pozakorytowych o różnej intensywności. Celem prowadzonych badań była ocena przydatności wielospektralnych, wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych (VHR) do identyfikacji form rzeźby takich powierzchni, poddanych zmniejszonej presji antropogenicznej.

Szczegółowymi badaniami objęto charakteryzujący się dużym stopniem naturalności fragment dna doliny Bugu, zlokalizowany w środkowej części jego podlaskiego przełomu (Kondracki, 2009), na odcinku od miejscowości Niemirów (197,5 km) do miejscowości Mierzvice (175,0 km) (ryc. 1). Rzeka charakteryzuje się tu krętym korytem o szerokości ok. 200 m. Szerokość doliny na badanym odcinku wynosi średnio 2 km (maksymalnie 2,9 km) i tylko w środkowej części (184–186 km) zwęża się do ok. 1 km. W dnie doliny można wyróżnić dwa rodzaje powierzchni – holoceniową równię zalewową i plejstoceniowy taras nadzalewowy (Janicki, 1999; Albrycht, 2001; Nitychoruk i in., 2003). Zarówno na obszarze równi zalewowej, jak i w strefie korytovej brak jest sztucznych elementów mogących w istotny sposób wpływać na przebieg naturalnych procesów morfogenetycznych. Koryto nie zostało poddane regulacji ani obwałowane, a na równi zalewowej nie przeprowadzono prac melioracyjnych (Rąkowski, 2003).

ZAŁOŻENIA PROCEDURY BADAWCZEJ

Podstawowymi materiałami poddanymi analizie były ortofotomapy wykonane na podstawie wielospektralnych, wysokorozdzielczych zdjęć z satelity IKONOS-2. Satelita ten był pierwszym na świecie systemem teledetekcyjnym typu CRSS (*Commercial Remote Sensing Satellite*), wyko-

nującym wielospektralne zobrazowania VHR (Dial i in., 2003). Pozyskuje on jednocześnie dwa rodzaje danych – panchromatyczne w zakresie promieniowania 445–900 nm oraz wielospektralne w czterech zakresach promieniowania – niebieskim (445–516 nm), zielonym (506–595 nm), czerwonym (632–698 nm) i bliskiej podczerwieni (757–853 nm). Rozdzielczość przestrzenna obrazów panchromatycznych wynosi 0,82 m, a wielospektralnych – 3,28 m przy rozdzielczości radiometrycznej 11 bitów (Wolniewicz, 2005; Digitalglobe, 2016; Geotimage, 2016).

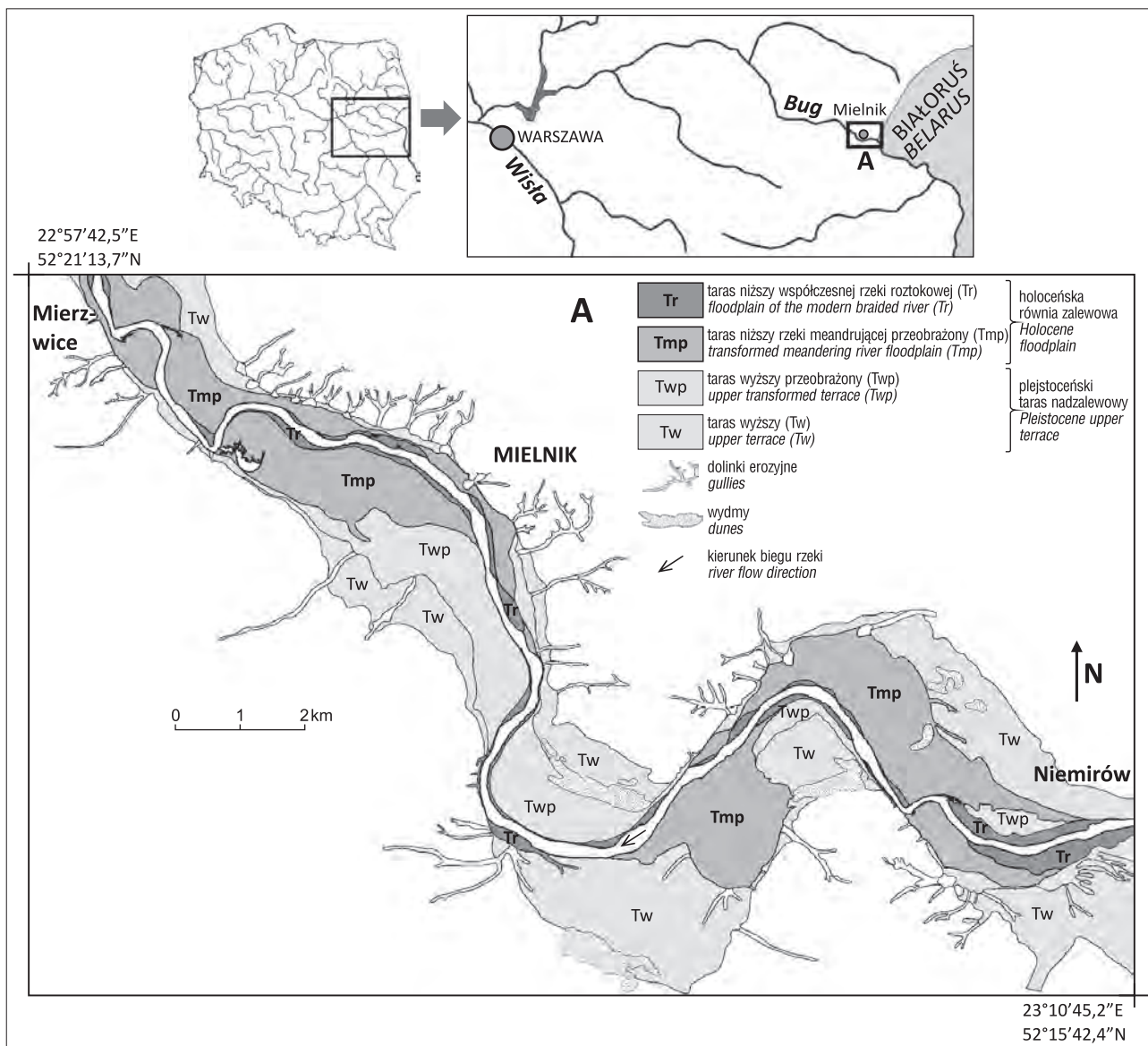
Dla każdego z badanych fragmentów równi zalewowej oddzielnie analizowano dwie ortofotomapy w różnych kompozycjach barwnych – naturalnych (RGB) i fałszywych z wykorzystaniem bliskiej podczerwieni (NRG). Ortofotomapa RGB zawierała jeden zbiór danych dla trzech zakresów promieniowania – czerwonego, zielonego i niebieskiego, a NRG jeden zbiór dla zakresu podczerwonego, czerwonego i zielonego. Rozdzielczość przestrzenna tych materiałów, definiowana jako terenowa rozdzielczość próbkowania GSD (*Ground Sample Distance*), wynosiła 0,82 m (Dial i in., 2002; Orych & Walczykowski, 2010). Prace fotointerpretacyjne prowadzono z wykorzystaniem bazy danych GIS, gdzie, oprócz ortofotomap RGB i NRG, podstawowymi rastrowymi warstwami informacyjnymi były mapy topograficzne w skali 1 : 25 000 i Szczegółowe Mapy Geologiczne Polski w skali 1 : 50 000. Wybrane, charakterystyczne dla danego fragmentu równi zalewowej formy rzeźby przeanalizowano pod kątem cech obrazu satelitarnego (struktury i tekstury), a także dokonano ich pomiarów morfometrycznych. Wyniki prac teledetekcyjnych zweryfikowano podczas badań terenowych. W terenie wykonano także pomiary deniwelacji występujących w obrębie wybranych form oraz sporządzono ich dokumentację fotograficzną. Pomiary terenowe wykonano z wykorzystaniem odbiorników DGPS-RTK.

WYNIKI BADAŃ

W wyniku analizy materiałów teledetekcyjnych i kartograficznych, a także przeprowadzonych prac terenowych (kartowania geomorfologicznego i wierceń geologicznych) w obrębie holoceniowej równi zalewowej Bugu, wydzielono dwa różniące się typy tarasów – taras niższy współczesnej rzeki roztokowej (Tr) oraz taras niższy rzeki meandrującej przeobrażony (T_{mp}) (ryc. 1).

Najmłodszym fragmentem równi zalewowej jest taras niższy współczesnej rzeki roztokowej (Tr). Sąsiaduje on bezpośrednio z korytem Bugu i występuje wzdłuż niego w postaci nieciągłej, wąskiej listwy o szerokości 20–300 m (ryc. 1). Dużą jego część stanowią znacznych rozmiarów dawne meandry korytovej (utrwalone roślinnością wyspy), które w wyniku zanikania koryt bocznych zostały włączone w obszar równi zalewowej. Taras ten ma stosunkowo płaską powierzchnię, a jego poszczególne fragmenty wznoszą się na wysokość 0,5–4,0 m ponad poziom średniej wody. Tr jest zbudowany ze współczesnych aluwii – głównie z piasków średnio- i drobnoziarnistych, niekiedy przewarstwionych żwirem. Identyfikacja form rzeźby występujących na powierzchni tego tarasu jest bardzo trudna ze względu na jego niewielką szerokość oraz występującą w wielu miejscach zwartą okrywą wierzbowych i topolowych łęgów nadrzecznych.

Największym pod względem powierzchni i najważniejszym dla prowadzonych prac fotointerpretacyjnych



Ryc. 1. Położenie obszaru badań i analizowany fragment dna doliny Bugu
 Fig. 1. Location of the study reach and analyzed zone Bug river valley

fragmentem równi zalewowej jest taras niższy rzeki meandrującej przeobrażony (Tmp). Występuje on w górnej (189,0–197,5 km) i dolnej (175,0–185,0 km) części badanego odcinka, gdzie sąsiaduje z głównym korytem lub jest od niego oddzielony wąską listwą tarasu niższego współczesnej rzeki roztokowej (Tr) (ryc. 1). Taras niższy rzeki meandrującej przeobrażony wznosi się na wysokość 1,5–6,0 m ponad poziom średniej wody i charakteryzuje się znaczną szerokością, która w wielu miejscach przekracza 1 km. Na odcinku 190–191 km ma on szerokość ok. 1,5 km i stanowi niemal całą powierzchnię dna doliny. Tmp jest zbudowany głównie z różnoziarnistych piasków, niekiedy przewarstwionych żwirami. W rejonie starorzeczy i innego typu obniżen terenu (np. wypełnionych wodą krewas czy rynien erozyjnych) w profilu litologicznym pojawiają się namuły piaszczyste oraz lokalnie torfy. Na badanym odcinku taras niższy rzeki meandrującej jest przeobrażonym fragmentem dna doliny o najbardziej zróżnicowanej morfologii. Wyniki przeprowadzonych analiz fotointerpretacyjnych zdjęć satelitar-

nych i badań terenowych pozwalają stwierdzić, że jego powierzchnia niemal w całości uległa przeobrażeniu w wyniku cyklicznych procesów erozji i akumulacji wywołanych działalnością wód wezbraniowych, a także ewolucji samego koryta.

Na podstawie analizy wysokorozdzielczych, wielospektralnych zdjęć satelitarnych na powierzchni równi zalewowej zidentyfikowano siedem typów charakterystycznych form rzeźby o zróżnicowanych cechach obrazu satelitarnego, cechach morfometrycznych i genezie – krewasy (1), gład krewasowy (2), zanikające koryta boczne (3), starorzecza (4), delty starorzeczy (5), stożki napływowe (6) i ślady przepływów wezbraniowych (7) (tab. 1, ryc. 2). W ich obrębie wydzielono 14 rodzajów form, z czego znacząca większość jest zlokalizowana na powierzchni Tmp. Tylko formy typu trzeciego (zanikające koryta boczne) znajdują się w obrębie Tr lub oddzielają go od Tmp (ryc. 3, 4). Schematyczne granice wybranych form rzeźby i przykłady ich obrazu satelitarnego w barwach fałszywych (NRG) przedstawiono na rycinie 2.

Tab. 1. Charakterystyczne formy rzeźby równi zalewowej Bugu zidentyfikowane na wielospektralnych zdjęciach satelitarnych VHR
Table 1. Bug floodplain specific landforms identified based on multispectral VHR satellite images

Typ formy <i>Landform type</i>	Nr <i>No.</i>	Rodzaj formy <i>Landform subtype</i>	Nr <i>No.</i>	Położenie (rodzaj tarasu)* <i>Location (terrace)*</i>
Krewasy <i>Crevasse channels</i>	1	krewasy głównego koryta proste <i>straight main channel crevasses</i>	1a	Tmp
		krewasy głównego koryta skośne <i>oblique main channel crevasses</i>	1b	Tmp
		krewasy starorzeczy <i>oxbow lake crevasses</i>	1c	Tmp
Glif krewasowy <i>Crevasse splay</i>	2	glif krewasowy głównego koryta <i>main channel crevasse splay</i>	2a	Tmp
		strefa glifu krewasowego głównego koryta <i>crevasse splay zones</i>	2b	Tmp
		glif krewasowy krewas starorzeczy <i>oxbow lake crevasse splay</i>	2c	Tmp
Zanikające koryta boczne <i>Side arms</i>	3	–	3	Tr, Tr/Tmp
Starorzecza <i>Oxbow lake</i>	4	prostopadłe do głównego koryta <i>oxbow lake perpendicular to main channel</i>	4a	Tmp
		równoległe do głównego koryta <i>oxbow lake paralel to main channel</i>	4b	Tmp
Delt starorzeczy <i>Oxbow lake deltas</i>	5	delt starorzeczy duże <i>large oxbow lake deltas</i>	5a	Tmp
		delt starorzeczy małe <i>small oxbow lake deltas</i>	5b	Tmp
Stožki napływowe <i>Alluvial fans</i>	6	stożki napływowe duże <i>large alluvial fans</i>	6a	Tmp
		stożki napływowe małe <i>small alluvial fans</i>	6b	Tmp, Twp
Ślady przepływu wezbraniowych <i>Flood erosion traces</i>	7	rynny erozyjne przepływu wezbraniowych <i>erosional pathways of overbank flow</i>	7a	Tmp, Twp, Tw

* Objaśnienia skrótów przedstawiono na rycinie 1

* *Abbreviations shown in Figure 1*

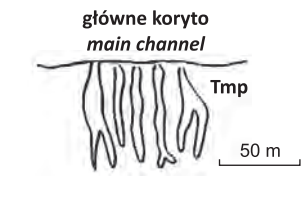
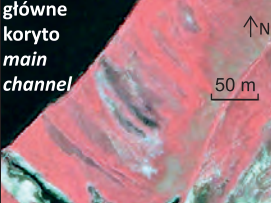
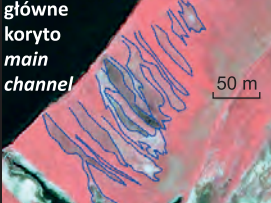
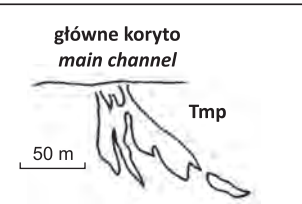


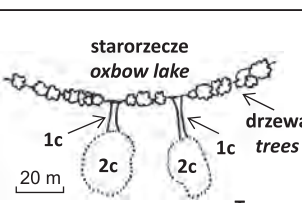


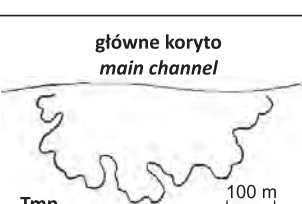
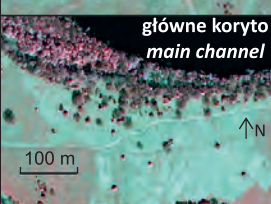
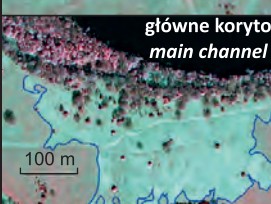
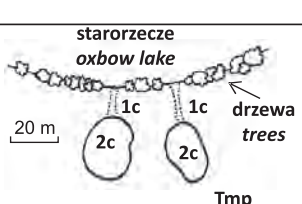


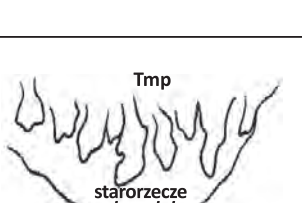
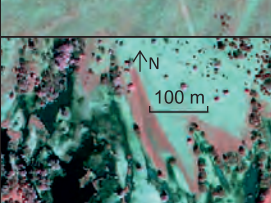
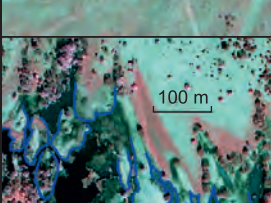



DYSKUSJA

Równia zalewowa na badanym odcinku doliny Bugu charakteryzuje się złożoną rzeźbą, o czym świadczy duża liczba rodzajów zidentyfikowanych form oraz ich różnorodność pod względem rozmiarów, wysokości/głębokości względnych i genezy. Zróżnicowanie to jest związane ze znacznym stopniem naturalności tej powierzchni (przede wszystkim brakiem wałów przeciwpowodziowych) oraz ze skomplikowaną budową geologiczną strefy korytovej. W korycie występują liczne kulminacje stropu podłoża współczesnych aluwów rzecznych zbudowane z gruntów o dużej odporności na erozję (głównie glin zwałowych). Są one przestrzennie powiązane z występującymi w strefach ich oddziaływania formami rzeźby (Ostrowski, 2011). Kulminacje takie w sposób istotny wpływają na główne kierunki przepływu wód wezbraniowych oraz są czynnikiem zwiększającym prawdopodobieństwo występowania zatorów lodowych (Falkowski, 2006). O dużej trwałości tych struktur świadczy fakt, że niektóre z nich, mające charakter pokrytych brukiem rezydualnym progów, zostały opisane podczas kartowania koryta Bugu w 1890 r. (Puciata, 1905).

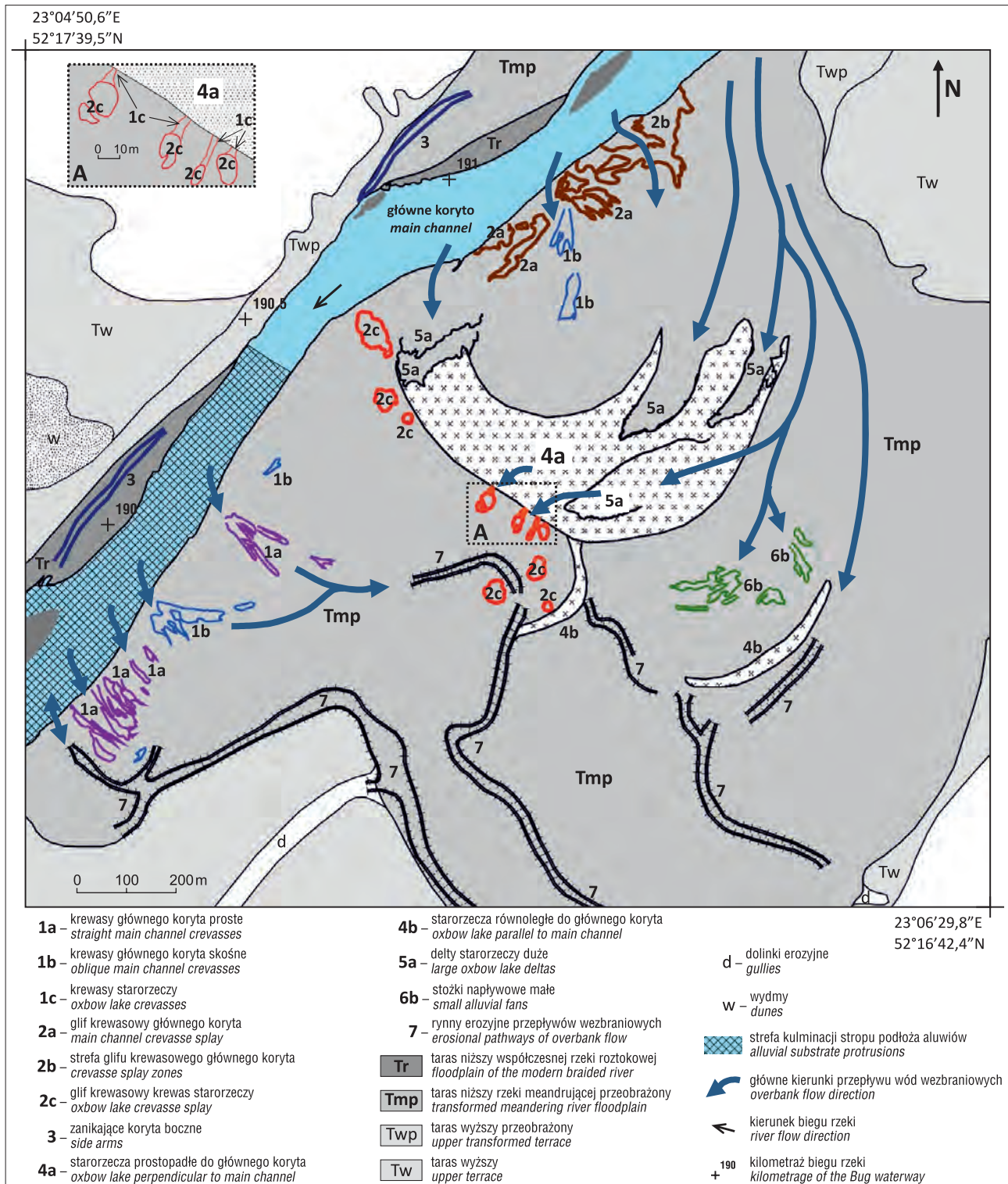
Wielospektralne zdjęcia satelitarne VHR wykonane przez satelitę IKONOS-2 umożliwiły identyfikację charakterystycznych form rzeźby równi zalewowej badanego odcinka oraz sporządzenie ich typologii (tab. 1). Analiza relacji przestrzennych, pomiędzy poszczególnymi rodzajami form oraz mającymi istotny wpływ na ich morfogenezę

odpornymi na erozję kulminacjami stropu aluwów, pozwoliła na określenie głównych kierunków przepływu wód wezbraniowych zarówno w obrębie dystalnej, jak i proksymalnej części równi zalewowej (ryc. 3, 4). Kluczowymi właściwościami materiałów teledetekcyjnych, umożliwiającymi skuteczną geomorfologiczną fotointerpretację tego obszaru, jest wysoka rozdzielczość radiometryczna w połączeniu z dostateczną rozdzielczością przestrzenną. Na zdjęciach satelitarnych zidentyfikowano zarówno formy o bardzo dużych, dochodzących do kilkuset metrów rozmiarach (strefy glifu krewasowego, stożki napływowe duże, starorzecza prostopadłe do głównego koryta), jak i formy o szerokości kilku i długości zaledwie kilkunastu metrów (krewasy głównego koryta proste czy krewasy starorzeczy) (ryc. 2–4). Udało się także poprawnie (co potwierdziły badania terenowe z wykorzystaniem mobilnego GPS-u oraz pomiary GPS-RTK) określić ich granice. W przypadku wielu form (np. palczastych odsypów budujących stożki napływowe czy delt starorzeczy) analiza taka bez wykorzystania zobrażeń VHR wymagałaby kosztownych i czasochłonnych badań terenowych.

Rozdzielczość przestrzenna (GSD) wynosząca 0,82 m okazała się wystarczająca do poprawnej interpretacji szczegółów morfologii form o bardzo małych rozmiarach. Przykładem mogą być tu obniżenia o szerokości ok. 2 m w miejscach erozji wału przykorytowego, stanowiące początek krewas głównego koryta prostych (1a) (ryc. 2). Dobrze widoczne na zdjęciach satelitarnych są także nieco szersze (ok. 4–5 m) przerwy w zadrzewieniu krawędzi

Typ form Landform type	Nr No.	Rodzaj form Landform subtype	Nr No.	Schematyczne granice formy Schematic outline landform	Wielospektralne zdjęcie satelitarne VHR (Ikonos-2, kanały: bliska podczerwień, czerwony, zielony) Multispectral VHR Satellite Image (Ikonos-2, Bands: Near-Infrared, Red, Green)	
					Zdjęcie satelitarne Satellite Image	Interpretacja manualna Manual interpretation
krewasy crevasse channels	1	krewasy głównego koryta proste straight main channel crevasses	1a			
		krewasy głównego koryta skośnie oblique main channel crevasses	1b			
		krewasy starorzeczy oxbow lake crevasses	1c			
głif krewasowy crevasse splay	2	strefa głifu krewasowego głównego koryta crevasse splay zones	2b			
		głif krewasowy krewas starorzeczy oxbow lake crevasse splay	2c			
delty starorzeczy oxbow lake deltas	5	delty starorzeczy małe small oxbow lake deltas	5b			
stożki napływowe alluvial fans	6	stożki napływowe duże large alluvial fans	6b			

Ryc. 2. Schematyczne granice i obraz satelitarne wybranych form rzeźby w barwach fałszywych (NRG)
 Fig. 2. Schematic outline and false-color (NRG) satellite images of chosen landforms



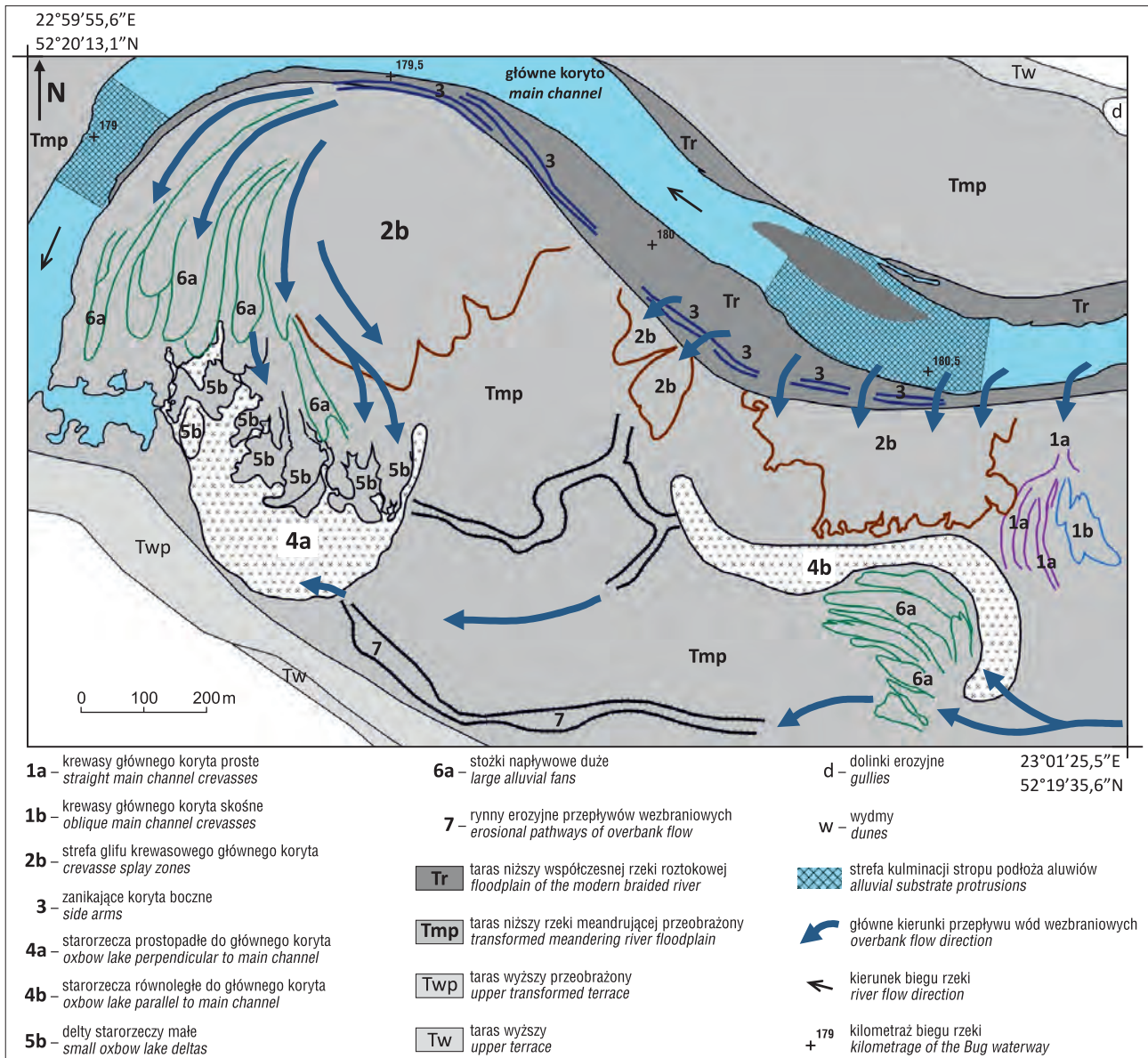
Ryc. 3. Położenie charakterystycznych form rzeźby równi zalewowej Bugu (189,5–191,5 km) zidentyfikowanych na wielospektralnych zdjęciach satelitarnych VHR

Fig. 3. Location of Bug floodplain and specific landforms identified based on multispectral VHR satellite images (189,5–191,5 km)

starorzeczy w miejscu przelewania się przez ich wały przykorytowe wód wezbraniowych stanowiące początek krewas starorzeczy (ryc. 2, 3).

Istotnym czynnikiem zwiększającym przydatność zobrazowań pozyskanych przez Ikonosa-2 jest ich rozdzielczość spektralna i związana z nią możliwość analizy obrazu równi zalewowej w barwnych fałszywych. Kompozycja z uwzględnieniem bliskiej podczerwieni (NRG) cha-

rakteryzuje się dla badanej powierzchni większym zróżnicowaniem barwnym i w większości przypadków daje lepsze możliwości fotointerpretacyjne niż kompozycja w barwach naturalnych. Charakterystyczne dla kompozycji NRG fototony (np. zdeponowanych na powierzchni Tmp piaszczystych osadów budujących strefy glifu krewasowego) pozwalają na precyzyjniejsze określenie granic, zwłaszcza w przypadku zbudowanych z piasków form



Ryc. 4. Położenie charakterystycznych form rzeźby równi zalewowej Bugu (178,5–181,0 km) zidentyfikowanych na wielospektralnych zdjęciach satelitarnych VHR

Fig. 4. Location of Bug floodplain and specific landforms identified based on multispectral VHR satellite images (178,5–181,0 km)

akumulacyjnych. Wykorzystanie kanału w zakresie 757–853 nm umożliwia także identyfikowanie granic form na podstawie występującego w ich obrębie składu gatunkowego roślin. Przykładem takim jest glik krewasowy krewas starorzeczy (2c) (ryc. 2), który – mimo niewielkich rozmiarów i bardzo małej wysokości względnej (10–30 cm) – jest dobrze widoczny w kompozycji NRG dzięki porastającym go charakterystycznym gatunkom traw. Niezwykle ważna dla prawidłowej interpretacji morfologii równi zalewowej jest także możliwość porównania obrazu tej samej formy na obu kompozycjach barwnych. Często dopiero wykorzystanie informacji zarejestrowanej zarówno w kompozycji RGB, jak i NRG oraz ich wspólna analiza pozwala na właściwą identyfikację form, a także określenie elementów ich morfologii. Dotyczy to zwłaszcza form rzeźby silnie przeobrażonych przez naturalne procesy fluwialne lub działalność człowieka, np. zabiegi agrotechniczne.

PODSUMOWANIE

Wielospektralne zdjęcia satelitarne o rozdzielczości przestrzennej <1 m (VHR) umożliwiły identyfikację form rzeźby równi zalewowej Bugu oraz szczegółów ich morfologii, także tych o rozmiarach zbliżonych do rozdzielczości przestrzennej zobrażeń.

Możliwości interpretacyjne obrazów satelitarnych znacznie podnosi porównanie ortofotomapy wykonanej w dwóch kompozycjach barwnych – naturalnych (RGB) i fałszywych z uwzględnieniem bliskiej podczerwieni (NRG). Umożliwia to rozpoznanie form rzeźby o wysokościach/głębokościach względnych rzędu 10 cm oraz identyfikację granic form słabo widocznych lub w określonych warunkach niewidocznych w terenie.

W większości przypadków lepsze możliwości interpretacyjne daje kompozycja barwna z uwzględnieniem bliskiej podczerwieni (NRG).

Analiza zależności przestrzennych pomiędzy formami rzeźby zidentyfikowanymi na wysokorozdzielczych zdjęciach satelitarnych równi zalewowej Bugu, w strefie jego podlaskiego przełomu, pozwoliła na sformułowanie koncepcji morfogenezy tego odcinka.

Zasadniczym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie wielospektralnych zdjęć satelitarnych VHR jest zwarta szata roślinna, która utrudnia lub uniemożliwia fotointerpretację form rzeźby. Dotyczy to zwłaszcza sąsiadującego z korytem tarasu niższego współczesnej rzeki roztokowej (Tr).

Przedstawiona w artykule próba oceny przydatności wielospektralnych zdjęć satelitarnych VHR dotyczy materiałów pozyskanych w konkretnej sytuacji hydrologicznej i fenologicznej. Należy zdawać sobie sprawę, że przydatność tego typu materiałów teledetekcyjnych zależy także od wielu czynników niezwiązanych z parametrami technicznymi i technologią ich wykonania. Do najważniejszych z nich należą warunki meteorologiczne i hydrologiczne (stany wody w korycie, przepływy pozakorytowe) panujące na terenie zlewni w okresie poprzedzającym oraz w czasie pozyskania zobrażeń. Wpływają one w istotny sposób na uwilgotnienie, fazę rozwojową roślin czy terminy wykaszania łąk, determinując satelitarny obraz dna doliny.

Autorzy dziękują Recenzentom niniejszej pracy za wnikliwe i cenne uwagi do pierwotnej wersji artykułu. Analizowane zobrazenia pozyskano w okresie od maja do końca sierpnia 2007 r. w ramach projektu badawczego MNiI nr 2P04E06929, zrealizowanego w Zakładzie Hydrogeologii Katedry Geoinżynierii SGGW w Warszawie.

LITERATURA

- ALBRYCHT A. 2001 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Sarnaki (531). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- ADAMCZYK J. & BĘDKOWSKI K. 2007 – Metody cyfrowe w teledetekcji. Wyd. SGGW, Warszawa, s. 239.
- CIOLKOSZ A., MISZALSKI J. & OŁĘDZKI J.R. 1978 – Interpretacja zdjęć lotniczych. Państw. Wyd. Nauk., Warszawa, s. 380.
- DIAL G., BOWEN H., GERLACH F., GRODECKI J. & OLESZCZUK R. 2003 – IKONOS satellite, imagery, and products. *Remote Sens. Environ.*, 88: 23–36.
- DIGITALGLOBE 2016 – http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_WorldView2_DS_PROD.pdf (stan na 6.03.2016).
- FALKOWSKI T. 2006 – Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytovej Wisły środkowej. *Rozpr. Nauk. Monogr. SGGW*, s. 128.
- FALKOWSKI T. & OSTROWSKI P. 2010 – Morfogeneza powierzchni tarasu zalewowej Wisły w okolicach Magnuszewa w obrazie zdjęć satelitarnych i lotniczych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, PAN, 9: 89–100.
- FALKOWSKI T. & OSTROWSKI P. 2012 – GIS jako narzędzie integrujące metody badań morfologii dna doliny Bugu na odcinku jego Podlaskiego Przełomu. *Prz. Nauk. Inż. Kształt.Srod.*, 21 (3): 151–158.
- GEOIMAGE 2016 – <http://www.geoimage.com.au/satellite/ikonos> (stan na 6.03.2016 r.).
- JANICKI T. 1999 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Stacja Nurzec (496). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KACZYŃSKI R. & EWIAK I. 2006 – Wysokorozdzielcze zobrazenia satelitarne a zdjęcia lotnicze. *Geodezja*, 12 (2/1): 257–265.
- KONDRACKI J. 2009 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa, s. 444.
- KURCZYŃSKI Z. 1999 – Zmierzch tradycyjnej kamery lotniczej. *Lotnicze kamery cyfrowe – stan obecny i perspektywy. Geodeta*, 11 (54).
- NITYCHORUK J., DZIERŻEK J. & STANCZUK D. 2003 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Janów Podlaski (532). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- ORYCH A. & WALCZYKOWSKI P. 2010 – Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów cyfrowych w oparciu o cele kalibracyjne. *Arch. Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21: 291–300.
- OSTROWSKI P. 2011 – Wykorzystanie wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych do identyfikacji form rzeźby wybranego fragmentu doliny Bugu [pr. doktor.]. SGGW, Warszawa.
- PUCIATA K. 1905 – Przewodnik po rz. Bugu od Brześcia do Serocka i po Bugu-Narwi. Druk Rubieszewskiego i Wrotnowskiego, Warszawa, s. 23.
- RAKOWSKI G. 2003 – Transgraniczna ochrona przyrody w dolinie Bugu. [W:] Dojlido J., Kowalczewski W., Miłaszewski R., Ostrowski J. (red.), *Rzeka Bug – zasoby wodne i przyrodnicze. Cz. IV. Środowisko przyrodnicze*. Wyd. IMGW, Warszawa: 368–389.
- WIERZBICKI G., OSTROWSKI P., MAZGAJSKI M. & BUJAKOWSKI F. 2013 – Using VHR multispectralremotesensing and LIDAR data to determine the geomorphologicaleffects of overbankflow on a floodplain (the Vistula River, Poland). *Geomorphology*, 183: 73–81.
- WOLNIEWICZ W. 2005 – Ocena potencjału geometrycznego zdjęć IKONOS i QuickBird. *Polskie towarzystwo informacji przestrzennej. Rocz. Geomatyki*, 3 (4): 219–232.

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2016 r.

Akceptowano do druku 18.08.2016 r.