

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (1), 57–70
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (1)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (1), 57–70
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (1)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.1.6

Piotr OSTROWSKI, Marta UTRATNA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Hydrologiczne uwarunkowania morfogenezy wybranych erozyjnych form rzeźby równi zalewowej na przykładzie doliny Bugu

The hydrological conditions of the morphogenesis in relation to the selected erosional landforms on the floodplain of the Bug river valley

Słowa kluczowe: geomorfologia fluwialna, erozyjne formy rzeźby, hydrologia, wezbranie, dolina Bugu

Key words: fluvial geomorphology, erosional landforms, hydrology, flood, Bug river valley

Wprowadzenie

Głównymi czynnikami wpływającymi na morfodynamikę równi zalewowej, a co za tym idzie na kierunki oraz tempo ewolucji rzeźby dolin rzecznych, są charakter, częstotliwość, czas trwania i przebieg przepływów pozakorytowych. Z punktu widzenia morfogenezy tego obszaru aspekt hydrologiczny zachodzących w jej obrębie procesów jest więc istotny, ale dość rzadko szczegółowo analizowany przez geomorfologów.

W artykule podjęto próbę analizy związku warunków hydrologicznych (zwłaszcza przebiegu wezbrań) z morfogenezą wybranych erozyjnych form rzeźby równi zalewowej doliny Bugu. W badaniach skoncentrowano się głównie na dwóch, często mylonych ze sobą (ze względu na podobne cechy morfometryczne) typach form – zanikających korytach bocznych oraz starorzeczach (Ostrowski, 2015). Jedną z przyczyn podjęcia tej tematyki była próba wyjaśnienia, dlaczego głębokość tych form często znacznie przekracza maksymalną głębokość koryta głównego. Zjawisko to zaobserwowano wielokrotnie podczas badań batymetrycznych prowadzonych w dolinie Bugu.

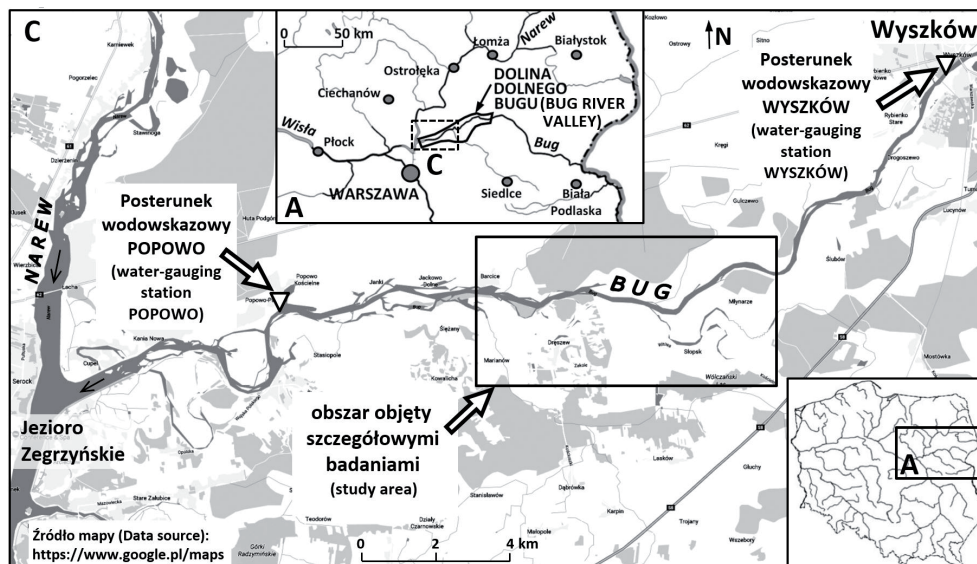
Obszar badań

Badania przeprowadzono w najbardziej wysuniętej na południowy zachód części Doliny Dolnego Bugu (Kondraci, 2009). Obszar badań obejmuje odcinek doliny o długości 23,7 km położony nieco powyżej ujścia Bugu do Jeziora Zegrzyńskiego, wyznaczony dwoma posterunkami wodowskazowymi: posterunkiem Wyszków zlokalizowanym na km 35,1 rzeki oraz posterunkiem Popowo (km 11,4) – rysunek 1. Posterunek Popowo uruchomiono w październiku 2013 roku i w założeniu ma ostrzegać przed występującymi tu często wezbrańiami zatorowymi.

Szczegółowej analizie poddano fragment doliny o długości około 7 km, od miejscowości Słopsk (km 25 rzeki) do miejscowości Barcice (km 18) – rysunki 1 i 2. Szerokość doliny w tym miejscu waha się od 3 do 6 km. W dnie doliny

wyróżniono trzy poziomy holoceničkih tarasów zalewowych oraz plejstoceničkih taras nadzalewowy (Kucharska i Pochocka-Szwarc, 2012b).

Autorki szczegółowej mapy geologicznej Polski (Kucharska i Pochocka-Szwarc, 2012b) w obszarze arkusz Wyszków (451) wydzielają poziom tarasu zalewowego I (Tz I) i włączają do niego wchodzące w skład strefy korytowej powierzchni licznych mielizn i piaszczystych odsypów o wysokości względnej do 1 m w stosunku do średniego stanu wody w korycie. Morfologia tych form korytowych jest zmienna i związana z aktualną sytuacją hydrologiczną (a dokładnie stanami wody). Powierzchnia poziomu tarasowego II (Tz II) znajduje się na rzędnej 80–83 m n.p.m. i charakteryzuje się zróżnicowaną szerokością. Największą szerokość (powyżej 2,5 km) forma ta osiąga w zachodniej (km 19,5 biegu rzeki) i wschodniej (km 25)



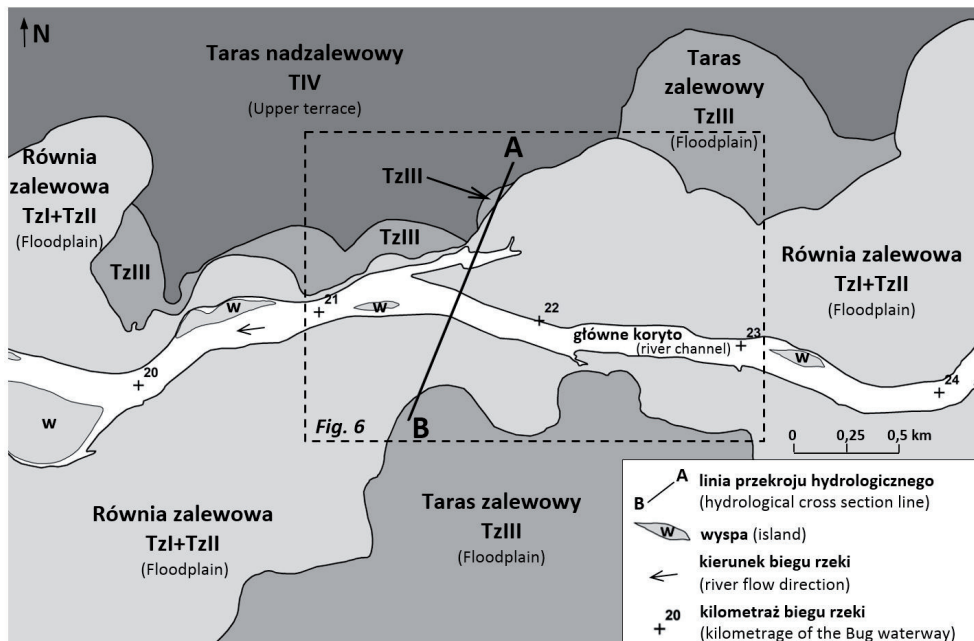
RYСУNEK 1. Położenie badanego fragmentu doliny Bugu
FIGURE 1. Location of the study area in the Bug river valley

części badanego odcinka. W jego centralnej części (km 21–22) poziom tarasowy II zwęża się do zaledwie 0,7 km. Na jego powierzchni występują liczne paleomeandry oraz starorzecza. Powierzchnia tarasu zalewowego III (Tz III) o wysokości względnej od 2 do 3 m w stosunku do średniego stanu wody w rzece znajduje się na rzędnej 83–86 m n.p.m. Taras ten występuje głównie w lewobrzeżnej części doliny, gdzie osiąga znaczną, przekraczającą kilometr, szerokość. W prawobrzeżnej części doliny stanowi on nieciągłą powierzchnię o szerokości od 50 do 700 m (rys. 2). Taras nadzalewowy (Tn) położony jest około 2 m ponad poziomem tarasu zalewowego III.

W pracy za powierzchnie równi zalewowej przyjęto fragment dna doliny cyklicznie zalewany w czasie wiosen-

nych wezbrań roztopowych. W jej skład wchodzi taras zalewowy II oraz znajdująca się na tej samej rzędnej część strefy korytovej definiowana przez Kucharską i Pochocką-Szwarc (2012a, b) jako taras zalewowy I. Taras zalewowy III, który jak wynika z archiwalnych danych hydrologicznych, jest podtapiany incydentalnie (raz na kilkanaście lat), nie był w tym artykule szczegółowo analizowany.

Ważnym czynnikiem, którym kierowano się przy wyborze terenu badań, był brak w obrębie równi zalewowej sztucznych elementów wpływających na naturalny przebieg procesów korytowych. Koryto rzeki nie zostało tu obwałowane ani uregulowane i znajduje się poza zasięgiem cofki Jeziora Zegrzyńskiego (Gromiec, 2003; Zieliński i Narowski, 2003). Wysoki stopień naturalności tego



RYSUNEK 2. Główne formy rzeźby dna doliny Bugu w strefie objętej szczegółowymi badaniami
 FIGURE 2. General landform borders of the study area of the Bug river valley

obszaru potwierdza występowanie wielu cennych przyrodniczo siedlisk chronionych w ramach sieci Natura 2000 (Wojciechowski, 2003).

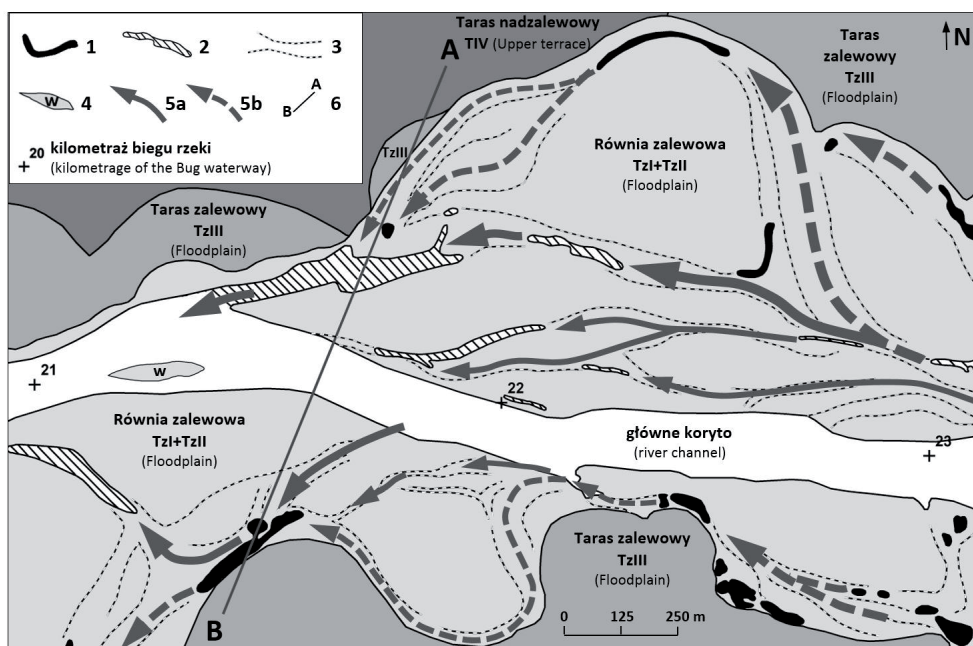
Materiały i metody

Wpływ warunków hydrologicznych na morfogenezę form rzeźby równi zalewowej badano na podstawie wyników prac terenowych (głównie pomiarów batymetrycznych i kartowania geomorfologicznego) wykonanych w latach 2013–2017 oraz analizy archiwalnych (z lat 1891–2015) danych hydrologicz-

nych, teledetekcyjnych i kartograficznych. Większość prac kameralnych (w tym analizę, interpretację oraz wizualizację wyników) wykonano w bazie danych GIS z wykorzystaniem pakietu oprogramowania ArcGIS 10.5 firmy Esri Inc.

Prace terenowe

Do najważniejszych prac terenowych należały badania batymetryczne koryta Bugu oraz wypełnionych wodą erozyjnych form rzeźby równi zalewowej (zanikającego koryta bocznego i starorzecza), znajdujących się na linii przekroju hydrologicznego (rys. 3). Wszystkie



RYSUNEK 3. Główne kierunki przepływu wód wezbraniowych w rejonie przekroju hydrologicznego „Somianka”: 1 – starorzecza; 2 – zanikające koryta boczne; 3 – ślady przepływów wezbraniowych; 4 – wyspy; 5 – kierunki przepływu wód wezbraniowych związane z erozyjnymi strukturami typów I (5a) i II (5b); 6 – linia przekroju hydrologicznego „Somianka”
 FIGURE 3. Overbank flow direction in the area of cross-section “Somianka”: 1 – oxbow lake; 2 – side arms; 3 – flood erosion traces; 4 – island; 5 – overbank flow direction related to erosion structures type I (5a) and II (5b); 6 – “Somianka” cross-section

echosondaże wykonano za pomocą zestawu hydrograficznego składającego się z jednowiązkowej echosondy SonarLite firmy Ohmex zintegrowanej z odbiornikiem DGPS Magellan FX324 zgodnie z przyjętą przez Ostrowskiego (2006) metodyką. Echosondaże strefy korytowej Bugu wykonano 23 i 24 września 2013 roku, a starorzecza 21 lipca 2015 roku. Echosondaż starorzecza został wykonany w ramach pracy magisterskiej (Makaruk, 2016) realizowanej na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW. Wyniki pomiarów batymetrycznych posłużyły do wykonania map batymetrycznych i hipsometrycznych tych form. W ramach prac terenowych wykonano także kartowanie wybranych fragmentów strefy korytowej i równi zalewowej.

Prace kameralne

Pierwszym etapem prac kameralnych było wyznaczenie granic koryta, równi zalewowej oraz występujących w obrębie dna doliny tarasów. Prace te wykonano w bazie GIS na podstawie wspólnej analizy:

- szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Wyszaków (451),
- szkicu geomorfologicznego stanowiącego załącznik do objaśnień do szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Wyszaków (451),
- map topograficznych w skali 1 : 10 000,
- numerycznego modelu terenu (NMT) wykonanego na podstawie lotniczego skaningu laserowego – ALS (ang. *airborne laser scanning*) w ramach

projektu informatycznego systemu osłony kraju (ISOK),

- wysokorozdzielczego wielospektralnego zobrazowania satelitarnego – VHR (ang. *very high resolution*) wykonanego przez satelitę WorldView-2,
- wyników terenowego kartowania strefy korytowej i równi zalewowej zapisanych w postaci wektorowych warstw informacyjnych.

Kolejnym etapem prac było wykonanie szkicu geomorfologicznego równi zalewowej. Podstawą do klasyfikacji oraz wyznaczenia granic wydzielonych w jej obrębie form było wielospektralne zobrazowanie VHR o rozdzielczości przestrzennej 0,6 m, zarejestrowane 13 lipca 2013 roku przez satelitę WorldView-2. Wyniki fotointerpretacji weryfikowano z danymi wysokościowymi (NMT) pozyskanymi na podstawie skaningu laserowego. W identyfikacji erozyjnych form rzeźby wykorzystano także archiwalne (z lat 1891–1991) mapy topograficzne w skali 1 : 25 000. Ostateczna weryfikacja wyników wszystkich prac teledetekcyjnych miała miejsce podczas prac terenowych. Zakupu zobrazowania satelitarnego dokonano w ramach projektu badawczego NCN 2012/07/N/ST10/03294.

Bardzo ważnym elementem prac kameralnych było wyznaczenie przekroju hydrologicznego. Wymagało to zestawienia trzech typów danych geoprzestrzennych – NMT, map hipsometrycznych wykonanych na podstawie echosondaży oraz wyników pomiarów terenowych GPS-RTK. Do konstrukcji przekroju wykorzystano dane NMT w formacie ASCII XYZ GRID zawierające współrzędne punktów w regularnej

siatce o oczku 1 m wyinterpolowanych na podstawie chmury punktów z ALS. Niestety NMT pozyskany z zasobów CODGiK-u wykonano na podstawie pomiarów terenowych w warunkach przepływu pozakorytowego, skutkującego zalaniem/podtopieniem niemal całej powierzchni tarasu zalewowego do rzędnej 82,2 m (w linii przekroju). Z tego powodu NMT został wykorzystany głównie do wyznaczenia profilu tarasu nadzalewowego i tarasu zalewowego III. Profil dna erozyjnych form rzeźby wypełnionych wodą wykonano na podstawie umieszczonych w bazie GIS map hipsometrycznych, a profil powierzchni równi zalewowej na podstawie wyników pomiarów terenowych.

Dane hydrologiczne wykorzystane podczas obliczeń zostały pozyskane z IMGW-PIB i obejmowały stany wody oraz przepływy z posterunków Wyszków i Popowo. Ze względu na brak danych hydrometrycznych dla profilu „Somianka” na podstawie uzyskanych danych dokonano interpolacji wyników z wykorzystaniem równania (Byczkowski, 1996):

$$Q_x = Q_G \left(\frac{Q_D - Q_G}{A_D - A_G} \right) \cdot (A_x - A_G)$$

gdzie:

Q_x – przepływ w przekroju obliczeniowym [$m^3 \cdot s^{-1}$],

Q_G – przepływ w przekroju wodowskazowym górnym [$m^3 \cdot s^{-1}$],

Q_D – przepływ w przekroju wodowskazowym dolnym [$m^3 \cdot s^{-1}$],

A_D – powierzchnia zlewni w przekroju wodowskazowym dolnym [m^2],

A_x – powierzchnia zlewni w przekroju obliczeniowym [m^2],

A_G – powierzchnia zlewni w przekroju wodowskazowym górnym [m^2].

Ze względu na stosunkowo krótkie funkcjonowanie posterunku Popowo oraz na kompletność uzyskanych danych do obliczeń wykorzystano jedynie dane z roku hydrologicznego 2015.

Wyniki i dyskusja

Ze względu na brak zabudowy hydrotechnicznej i bogatą rzeźbę równi zalewowej ujściowy fragment doliny Bugu jest dogodnym obszarem dla badań naturalnych tendencji procesów morfogenetycznych, na co wskazywali między innymi Falkowski (1971) i Mojski (2005). W literaturze do niedawna nie było jednak opracowań dotyczących morfogenezy doliny Bugu. Jednym z nielicznych jest ocena zmian morfologii strefy korytowej Bugu na odcinku między km 12 a km 22 biegu rzeki (Ostrowski i Kaszyński, 2014).

Na badanym odcinku doliny Bugu do jednych z najlepiej rozpoznawalnych erozyjnych form rzeźby równi zalewowej należą zanikające koryta boczne (2) i starorzecza (1) – rysunek 3. Oba typy form charakteryzują się podobnymi cechami morfometrycznymi (obniżenia wypełnione wodą), ale odmienną genezą. Zanikające koryta boczne to wydłużone, niekiedy łukowato wygięte formy powstałe w wyniku zanikania koryt oddzielających znacznych rozmiarów wyspy od głównego koryta. Występują one głównie w proksymalnej części równi zalewowej, często stanowiąc naturalną granicę strefy korytowej (granicę między tarasami Tz I i Tz II). Zanikające koryta boczne charakteryzują się szero-

kością od 10 do 25 m i znaczną długością, często przekraczającą nawet 200 m. Największa tego typu forma, znajdująca się na linii przekroju hydrologicznego, ma aż 520 m długości i od 40 do 90 m szerokości. W warunkach średnich i wysokich stanów wody jest ona nadal połączona z głównym korytem Bugu.

Starorzecza to wypełnione wodą fragmenty dawnych meandrów, występujące zazwyczaj w dystalnej części równi zlewowej (Tz II). Rozmiary zidentyfikowanych na badanym odcinku form są podobne do zanikających koryt bocznych. Największe na objętym szczegółowymi badaniami odcinku starorzecze, znajdujące się na linii przekroju hydrologicznego, ma 290 m długości i 30 m szerokości (rys. 3). Starsze formy typów 1 i 2 są często trudne do odróżnienia, a ich właściwa identyfikacja wymaga analizy archiwalnych zdjęć lotniczych lub map topograficznych.

Nieco trudniejszymi do rozpoznania erozyjnymi formami rzeźby równi zlewowej są ślady przepływów wezbraniowych (3) będące wynikiem cyklicznej erozyjnej działalności wód wezbraniowych. Są to wydłużone, czasami rozgałęzione obniżenia o zróżnicowanych rozmiarach – szerokości od 10 do 90 m i długość od kilkudziesięciu do ponad 600 m. Formy te na badanym obszarze charakteryzują się niewielkimi głębokościami względnymi (do 1 m), a ich granice nie są wyraźnie zaznaczone. W warunkach przepływów korytowych tylko najgłębsze fragmenty niektórych form tego typu są wypełnione wodą.

Opisane typy form (1, 2, 3) na badanym fragmencie równi zlewowej łączą się ze sobą w ciągi obniżeń tworzące erozyjne struktury odzwierciedlające

główne trasy przepływu wód wezbraniowych. Analiza zobrazowań satelitarnych VHR i NMT wykonanego na podstawie ALS pozwoliła na identyfikację dwóch głównych typów takich struktur erozyjnych (rys. 3):

- typu I składającego się z zanikających koryt bocznych (2) i śladów przepływów wezbraniowych (3) zlokalizowanych w proksymalnej części równi zlewowej i stanowiących często naturalną granicę między Tz I i Tz II (granicę strefy korytowej),
- typu II składającego się ze starorzeczy (1) i śladów przepływów wezbraniowych (3) zlokalizowanych w dystalnej części równi zlewowej (w bezpośrednim sąsiedztwie Tz III) i stanowiących zazwyczaj naturalną jej granicę.

Podczas badań batymetrycznych doliny Bugu prowadzonych w Zakładzie Hydrogeologii SGGW w latach 2013–2017 stwierdzono, że średnia głębokość wielu starorzeczy i zanikających koryt bocznych znacznie przekracza maksymalne głębokości występujące w głównym korycie rzeki, co wskazuje na ich wtórną erozję. Zdaniem autorów przyczyna tego zjawiska wiąże się z czynnikami hydrologicznymi.

W celu oceny wpływu warunków hydrologicznych na morfogenezę tych form przeanalizowano przepływy i rzędne zwierciadła wody dla przekroju „Somianka” (rys. 4) zlokalizowanego w naturalnym zwiężeniu równi zlewowej na wysokości km 21+600 (rys. 2). Przekrój o długości 1267 m przecina najważniejsze na badanym odcinku typy form rzeźby: Tn, Tz III, równię zlewową, koryto Bugu oraz zanikające koryto boczne i starorzecze. Maksymalna głębokość

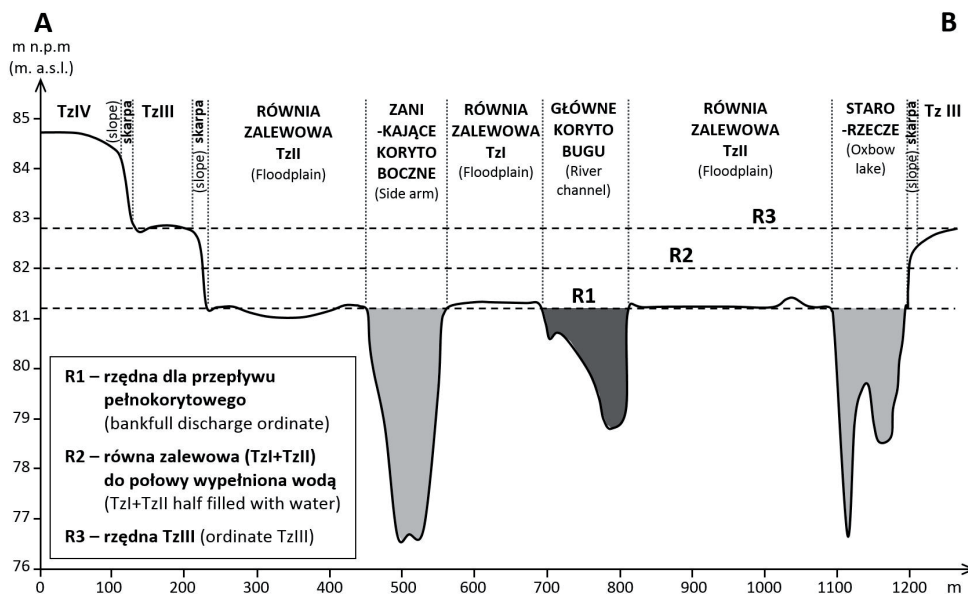
zanikającego koryta bocznego i starorzecza w linii przekroju wynosi 4,6 m, a więc niemal dwukrotnie przekracza maksymalną głębokość głównego koryta rzeki (2,4 m) – rysunek 4. Należy podkreślić, że stwierdzone na podstawie badań batymetrycznych maksymalne głębokości obu tych form są znacznie większe i wynoszą odpowiednio 5 i 7,5 m.

Analizując rzędne zwierciadła wody i przepływy dla przekroju „Somianka”, rozpatrywano cztery odmienne sytuacje hydrologiczne i morfodynamiczne (tab., rys. 4, 5):

- Zakres rzędnej zwierciadła wody (R) waha się od rzędnej punktu dennego do rzędnej punktu brzegowego (R1 = 81,3 m n.p.m.) – rysunek 4. Mamy wtedy do czynienia z niepełnym wypełnieniem głównego koryta Bugu lub przepływem pełnokorytowym. W obrębie całej równi zalewowej aktywne jest tylko główne koryto

lub jego część. W badanym okresie trwało to 159 dni, a więc niespełna 44% roku hydrologicznego. Średni przepływ dla tego okresu wyniósł $48,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab.).

- Rzędna R jest większa od R1, a mniejsza lub równa rzędnej R2 (82,0 m n.p.m.) – rysunek 4. Mamy wtedy do czynienia z przepływem pozakorytowym i częściowym wypełnieniem Tz I i Tz II wodą (maksymalnie do połowy wysokości w linii przekroju). Wyniki skaningu laserowego (LIDAR) potwierdzają, że podtopione są znaczne fragmenty równi zalewowej. Ciągi obniżen złożone z erozyjnych formy rzeźby stopniowo wypełniają się wodą, ale nie są jeszcze w pełni aktywne jako uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych. Taka sytuacja trwała 164 dni, a więc niespełna 45% roku hydrologicznego. Średni



RYСУNEK 4. Przekrój hydrologiczny „Somianka”
 FIGURE 4. “Somianka” cross-section

przepływ dla tego okresu wyniósł $119,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab.).

- Rzędna R jest większa od R2, a mniejsza lub równa rzędnej R3 (82,7 m n.p.m), na której w linii przekroju znajduje się Tz III (rys. 4). Zalana jest wtedy cała powierzchnia równi zalewowej, a erozyjne formy rzeźby są w pełni aktywne jako uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych. Trwało to przez 41 dni, a więc ponad 11% roku hydrologicznego. Średni przepływ dla tego okresu wyniósł $187,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab.).
- Rzędna R jest większa od R3, co powoduje podtopienie tarasu nadzalewowego (rys. 4). W takim wypadku erozyjne formy rzeźby są nadal w pełni aktywne jako uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych, ale wartości średnich i maksymalnych przepływów spadają. Wskazuje to na zmniejszenie nasilenia procesów erozyjnych w obrębie równi zalewowej. W trakcie analizowanego okresu taka sytuacja wystąpiła incydentalnie i trwała tylko jeden dzień.

Powyższe wyniki potwierdzają specyfikę hydrologiczną doliny Bugu, na którą wskazuje wielu autorów (Michalczyk i Sobolewski, 2002; Mierkiewicz i Sasim, 2003). Rzeka na tym odcinku charakteryzuje się dużą zmiennością zarówno przepływów, jak i stanów wody, co jest związane z występowaniem co najmniej dwu wezbrań (wiosennego roztopowego oraz opadowego latem i jesienią), a także letnio-jesiennych niżówek hydrologicznych. Zarówno wezbrania, jak i niżówki trwają stosunkowo długo. Równia zalewowa na badanym odcinku

jest wyniesiona zaledwie od około 0,4 do 0,7 m ponad średni stan wody w korycie (Ostrowski i Kaszyński, 2014), dlatego też cyklicznie powtarzają się tam okresy przepływu pozakorytowego trwające często ponad połowę roku hydrologicznego (tab.).

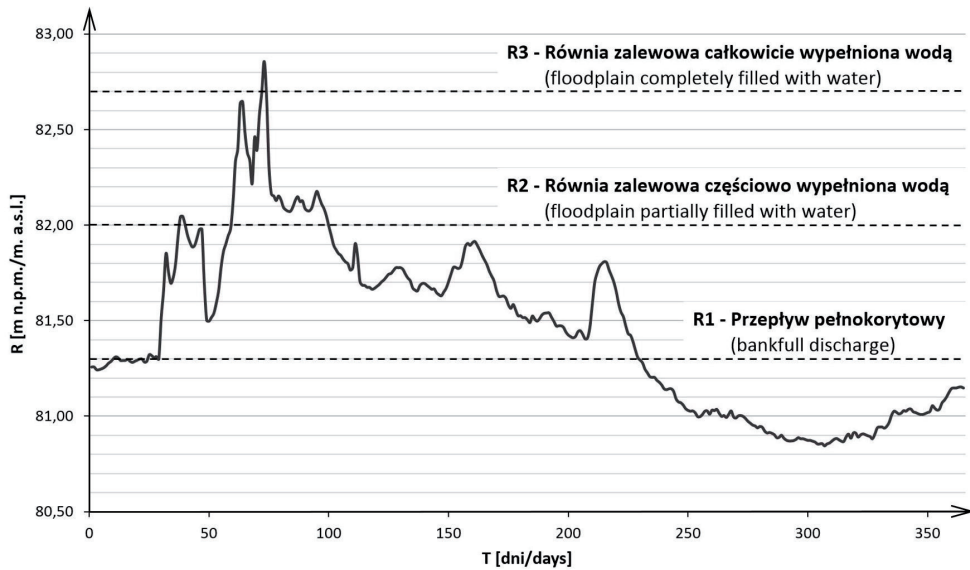
Najistotniejsza dla morfodynamiki badanego odcinka wydaje się być sytuacja, w której zalana jest cała powierzchnia równi zalewowej, a erozyjne formy rzeźby typów 1, 2 i 3 łączące się w ciągi obniżenia funkcjonują jako uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych (rys. 3). W analizowanym okresie sytuacja taka trwała zaskakująco długo bo niemal przez półtora miesiąca. Wartość zarówno średniego ($187,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), jak i maksymalnego ($209,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) przepływu (tab.) wskazuje, że właśnie w tym przypadku w obrębie równi zalewowej mamy do czynienia z największym nasileniem procesów erozyjnych. Dla morfogenezy zanikającego koryta bocznego i starorzecza zlokalizowanych na linii przekroju obie te formy są kluczowe, bo pełnią funkcję elementu łączącego erozyjne struktury (ciągi obniżenia) typów I i II (rys. 3). Tak więc w zanikającym korycie bocznym koncentruje się niemal cały przepływ wód wezbraniowych z prawobrzeżnej części, a w starorzeczu z lewobrzeżnej części równi zalewowej.

Bardzo interesujący wydaje się też przebieg największego w analizowanym okresie wezbrania (rys. 6). W początkowej jego fazie (od 29 listopada do 31 grudnia 2014 r.) wzrostom stanu wody odpowiadały wzrosty przepływu. W okresie tym poziom zwierciadła wody dla przekroju „Somianka” podniósł się o 0,82 m, a przepływ zwiększył ponad dwukrotnie, z 80 do $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Od

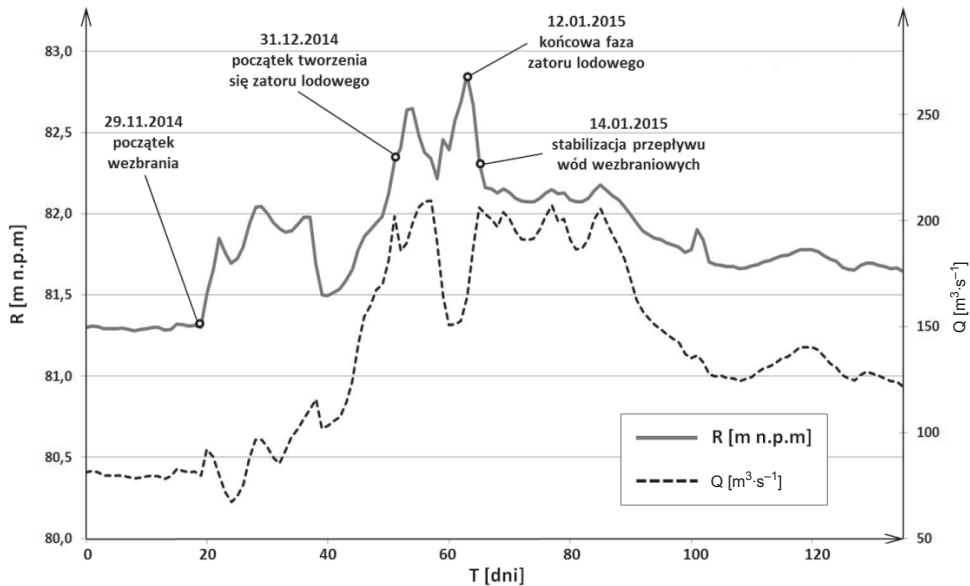
TABELA. Sytuacja hydrologiczna i morfodynamiczna oraz odpowiadające jej zakresy czasowe występowania wybranych przedziałów rzędnej zwierciadła wody (R) i wartości przepływu (Q) dla przekroju „Somianka” w roku hydrologicznym 2015; R1 = 81,3, R2 = 82,0, R3 = 82,7 m n.p.m.
 TABLE. Hydrological and morphodynamical situation with corresponding time ranges of occurrence chosen ranges of the water table elevation ordinate (R) and discharge values (Q) for the “Somianka” cross-section in the hydrological year 2015; R1 = 81.3, R2 = 82.0, R3 = 82.7 m a.s.l.

Sytuacja hydrologiczna Hydrological situation	Sytuacja morfodynamiczna Morphodynamical situation	Zakres rzędnej zwierciadła wody Magnitude of water levels (R)	Zakres czasowy Time range		Przepływ dla danego zakresu rzędnej zwierciadła wody Discharge (Q) corresponding to particular range of water levels	
			T [dni] [days]	udział w r.h. share in h.y. [%]	SQ [m ³ ·s ⁻¹]	WWQ [m ³ ·s ⁻¹]
Niepełne wypełnienie koryta lub przepływ pełnokorytowy Riverbed partially filled or bankfull discharge	wypełnione woda i aktywne jest tylko główne koryto lub jego część	R ≤ R1	159	43,6	48,5	81,2
Przepływ pozakorytowy Overbank discharge	zalaną są fragmenty równi zalewowej, erozyjne formy rzeźby nie są jeszcze w pełni aktywne	R1 < R ≤ R2	164	44,9	119,8	172,9
	zalana jest cała powierzchnia równi zalewowej, erozyjne formy rzeźby są w pełni aktywne jako uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych	R2 < R ≤ R3	41	11,2	187,5	209,6
	podtopiony jest taras nadzalewowy, równia zalewowa jest w pełni aktywna jako droga przepływu wód wezbraniowych	R > R3	1	0,3	164,1	164,1

r.h. – rok hydrologiczny / h.y. – hydrological year.



RYSUNEK 5. Hydrogram stanów wody dla przekroju „Somianka” w roku hydrologicznym 2015
 FIGURE 5. Water levels for the “Somianka” cross-section, hydrological year 2015



RYSUNEK 6. Przebieg analizowanego wezbrania dla przekroju „Somianka”
 FIGURE 6. The course of the analyzed high water stage for “Somianka” cross-section

31 grudnia 2014 roku wzrostom stanów wody towarzyszyły spadki przepływu, co interpretuje się jako skutki powstania zatoru lodowego w głównym korycie Bugu. Zjawisko to było najbardziej wyraźne pod koniec drugiego tygodnia stycznia, kiedy to wzrostowi stanu wody o około 0,5 m towarzyszył spadek przepływu o ponad $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przypuszcza się, że wysoki stan wody w tej fazie wezbrania ($R_2 < R \leq R_3$) uaktywnił erozyjne formy rzeźby, które w tej sytuacji hydrologicznej zaczęły pełnić funkcję naturalnych kanałów ulgi. Zdaniem autorów był to jeden z czynników, który doprowadził do stosunkowo szybkiej stabilizacji przepływu wód wezbraniowych (14 stycznia 2015 r.), objawiającej się spadkiem stanu wody przy jednoczesnym wzroście wartości przepływu (rys. 6). Potwierdzenie powyższej interpretacji wymaga jednak terenowych pomiarów wartości przepływu w obrębie analizowanych form, w warunkach wezbrania.

Wnioski i podsumowanie

W dolinie Bugu formy rzeźby równi zalewowej takie jak zanikające koryta boczne i starorzecza ulegają wtórnej erozji. Efektem tego procesu jest ich znaczna głębokość, często nawet ponad dwukrotnie przekraczająca maksymalną głębokość głównego koryta rzeki. Przyczyną wtórnej erozji może być to, że formy te łączą ciągi obniżień stanowiących uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych. W ich obrębie w czasie wezbrań koncentruje się więc zarówno przepływ z dystalnej, jak i proksymalnej części równi zalewowej. Na badanym odcinku do takiej sytuacji hydrologicznej

dochodzi cyklicznie i trwa to zaskakująco długo – w analizowanym przypadku ponad 11% roku hydrologicznego.

W wezbraniach zatorowych występujące w obrębie równi zalewowej ciągi obniżień złożone z erozyjnych form rzeźby pełnią funkcję naturalnych kanałów ulgi ograniczających skutki powodzi. Zdaniem autorów zanikające koryta boczne i starorzecza, które w opisanych wcześniej warunkach hydrologicznych przejmują funkcję głównego koryta, są tutaj kluczowe. Jest to jeden z powodów, dla których formy te nie powinny być przekształcane antropogenicznie (niszczone), do czego niestety dochodzi w innych częściach doliny Bugu.

Celem artykułu było zwrócenie uwagi na aspekt hydrologiczny morfogenezy i funkcjonowania erozyjnych form rzeźby równi zalewowej w warunkach przepływów pozakorytowych. Zdaniem autorów jest on niezwykle istotny dla morfodynamiki dna doliny, a w szczególności dla przebiegu wezbrań i powodzi (zwłaszcza zatorowych). Szczegółowa analiza tych zagadnień wymaga dalszych prac i będzie kontynuowana. Ma ona duże znaczenie w kontekście zrównoważonego zagospodarowania dolin rzecznych (ograniczania skutków powodzi) oraz ochrony cennych przyrodniczo siedlisk związanych z tymi formami.

W artykule nie analizowano wszystkich czynników wpływających na morfogenezę erozyjnych form równi zalewowej. Nie zostały omówione między innymi bardzo istotne uwarunkowania geologiczne (Falkowski, 2006) czy hydrogeologiczne (Bujakowski i Falkowski, 2017), które będą przedmiotem przyszłych publikacji.

Literatura

- Bujakowski, F. i Falkowski, T. (2017). Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do oceny warunków przepływu wód w osadach równi zalewowej. *Przegląd Geologiczny*, 65(7), 443-449.
- Byczkowski, A. (1996). *Hydrologia*. T. 2. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Falkowski, E. (1971). Historia i prognoza rozwoju koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski. *Biuletyn Geologiczny*, 12, 5-122.
- Falkowski, T. (2006). *Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytowej Wisły środkowej*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Kondracki, J. (2009). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kucharska, M. i Pochocka-Szwarc, K. (2012a). *Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50 000, arkusz Wyszków (451)*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
- Kucharska, M., Pochocka-Szwarc K. (2012b). *Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50000, arkusz Wyszków (451)*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
- Makaruk, P. (2016). *Wykorzystanie danych geoprzestrzennych w badaniu morfologii starorzeczy w Dolinie Dolnego Bugu*. (niepublikowana praca magisterska). Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa.
- Michalczyk, Z. i Sobolewski, W. (2002). Charakterystyka hydrologiczna dorzecza Bugu. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sec B*, 57(7), 111-126.
- Mierkiewicz, M. i Sasim, M. (2003). Warunki formowania się odpływu – powódzie i susze. W: J. Dojlido, W. Kowalczewski, R. Miłaszewski i J. Ostrowski (red.), *Rzeka Bug zasoby wodne i przyrodnicze. Część IV – Środowisko przyrodnicze*. Warszawa: Wydawnictwo IMGW.
- Mojski, J.E. (2005). *Ziemia polskie w czwartorzędzie. Zarys morfogenezy*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Ostrowski, P. (2006). Wykorzystanie GIS i GPS w badaniach hydrograficznych prowadzonych dla celów dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich (na przykładzie koryta rzeki i sztucznego zbiornika). *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej – Budownictwo*, 28, t. 1. 239-247.
- Ostrowski, P. (2015). Zróżnicowanie erozyjnych form rzeźby dna doliny w strefie podlaskiego przełomu Bugu. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 24(4), 350-360.
- Ostrowski, P. i Kaszyński, K. (2014). Ocena tendencji współczesnej ewolucji wybranego fragmentu koryta dolnego Bugu na podstawie materiałów kartograficznych i teledetekcyjnych. *Landform Analysis*, 26, 11-20.
- Wojciechowski, K. (2003). Europejski korytarz ekologiczny doliny Bugu. W: J. Dojlido, W. Kowalczewski, R. Miłaszewski i J. Ostrowski (red.), *Rzeka Bug zasoby wodne i przyrodnicze. Część IV – Środowisko przyrodnicze*. Warszawa: Wydawnictwo IMGW.
- Zieliński, J. i Narowski, S. (2003). Zabudowa regulacyjna. W: J. Dojlido, W. Kowalczewski, R. Miłaszewski i J. Ostrowski (red.), *Rzeka Bug zasoby wodne i przyrodnicze. Część III – Zagospodarowanie zlewni*. IMGW. Warszawa: Wydawnictwo IMGW.

Streszczenie

Hydrologiczne uwarunkowania morfogenezy wybranych erozyjnych form rzeźby równi zalewowej na przykładzie doliny Bugu. Celem pracy była analiza związku warunków hydrologicznych z morfogenezą erozyjnych form rzeźby równi zalewowej Doliny Dolnego Bugu. Stwierdzono, że formy takie jak zanikające koryta boczne i starorzecza w wyniku cyklicznych wezbrań ulegają wtórnej erozji. Główną tego przyczyną jest to, że łączą one ciągi obniżen stanowiące uprzywilejowane drogi przepływu wód wezbraniowych. W wezbraniach zatworowych formy te przejmują funkcję głównego koryta, ograniczając skutki powodzi.

Summary

The hydrological conditions of the morphogenesis in relation to the selected erosional landforms on the floodplain of the Bug river valley. The aim of the study was to analyze the relationship between hydrological conditions and morphogenesis of erosional landforms on the floodplain of the Bug river valley. It was found that forms such as side arms and oxbow lakes as a result of cyclical floods are subject to secondary erosion. The main reason for this phenomenon is the fact that they combine strings of overbank flow direction. In the case of ice storms, these forms take on the role of the main channel limiting the effects of floods.

Authors' addresses:

Piotr Ostrowski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Budownictwa i Inżynierii i Środowiska
Katedra Geoinżynierii, Zakład Hydrogeologii
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159
Poland
e-mail: piotr_ostrowski@sggw.pl

Marta Utratna
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Budownictwa i Inżynierii i Środowiska
Katedra Inżynierii Wodnej, Zakład Hydrologii
i Zasobów Wodnych
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159
Poland
e-mail: m.utatna@levis.sggw.pl