

OCENA STANU ORAZ IDENTYFIKACJA ZABURZEŃ PROCESÓW FLUWIALNYCH W KORYTACH RZEK KARPACKICH

IDENTIFICATION OF THE CURRENT STATE AND FLUVIAL PROCESSES DISTURBANCES IN CHANNELS OF CARPATHIAN RIVERS

Andrzej Strużyński

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Obowiązujące w Polsce prawo wodne wprowadza wymóg waloryzacji stanu i poprawy jakości wód. Ocenę stanu wód wykonuje się głównie na podstawie parametrów biotycznych i fizykochemicznych. Pytanie o jakość parametrów hydromorfologicznych nie pojawia się, gdy stan wód płynących jest bardzo dobry, a kiedy jest dobry i średni, ich wynik powinien być zgodny z pozostałymi waloryzacjami. Tego typu podejście nastawione jest na ocenę skutków i nie odpowiada na pytanie o przyczyny postawienia dobrej oceny danemu odcinkowi rzeki. Nie można w takiej sytuacji określić trwałości istniejącego ekosystemu ani tendencji, jakim może on podlegać w przyszłości. Ważnym elementem waloryzacji hydromorfologicznej jest określenie intensywności procesów fluwialnych w korycie rzeki oraz możliwej dynamiki ich zmian. Presje hydromorfologiczne powodują zaburzenia równowagi hydrodynamicznej objawiające się zmianami typu koryta, jego wcięciem oraz zmianą składu granulometrycznego uziarnienia dna. W artykule podjęto próbę waloryzacji procesów fluwialnych. Jej wynik może być zastosowany do dokładnej oceny aktualnej jakości i możliwych zmian w korytach rzek górskich.

Abstract. The current Polish Water Law requires adjustment and improvement of water quality. The assessment of the status of water is carried out mainly on the basis of biotic, physical and chemical parameters. Question about the quality of hydromorphological parameters does not appear when the state of flowing water is very good, and when it is good and average the result should be consistent with the other valorization. This approach is aimed at evaluating the effects and does not respond to the questions about reasons why good judgment is given for considered reach of the river. The current evaluation doesn't

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Andrzej Strużyński, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24-28, 30-059 Kraków; e-mail: rmstruzy@cyf-kr.edu.pl.

indicate the stability of the ecosystem or trends the developing the future state. Do not be in such a situation, the useful life of the existing ecosystem or trends which may be in the future. An important element of the valuation is to determine the intensity of fluvial processes in the riverbed, and the possible dynamics of their changes. Hydromorphological pressures cause disturbances of hydrodynamic balance manifested by changes of the channel types, the channel incision and change the composition of the grain size distribution of the bed surface. This article attempts to indexation fluvial processes. The result can be used to accurately assess the current quality and possible changes in the mountain river beds.

Słowa kluczowe: rzeki i potoki górskie, równowaga hydrodynamiczna, indeks formy korytowej, intensywność przepływu

Keywords: rivers and mountain streams, hydrodynamic balance, channel form index, flow intensity

WSTĘP

Koryta rzek górskich w ostatnich latach na wielu odcinkach pogłębiają się na skutek zmian użytkowania zlewni i dolin rzecznych. Waloryzacja hydromorfologiczna pozwala na określenie jakości rzeki jako siedliska. Trudno jest jednak określić tendencje zmian koryt rzecznych na przestrzeni dłuższego okresu. Występujące na danym odcinku rzecznych procesy fluwialne powodują wytworzenie ściśle określonego koryta. Może ono znajdować się w stanie zrównoważonym lub nie. W odcinkach rzek górskich znajdujących się poniżej tzw. kotła zbiorczego istnienie równowagi hydrodynamicznej jest pożądane. W przypadku jej braku możemy spodziewać się istnienia zaburzeń procesów fluwialnych.

CEL I METODYKA BADAŃ

Na podstawie badań przeprowadzonych w rzekach: Biały Dunajec i Czarny Dunajec, Skawa i Białka, przedstawiono w artykule ocenę zmian intensywności i zaburzeń procesów fluwialnych w rzekach i potokach górskich. W tym celu wykonano pomiary przekrojów poprzecznych i podłużnych w rzekach i ich dolinach oraz pomiary granulometryczne i obliczono przepływy charakterystyczne. Dla przepływów brzegowych, korytotwórczych oraz o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia wykonano prognozę stabilności dna, co pozwoliło na określenie zmian składu granulometrycznego pokrywy podczas przyborów wody oraz wyznaczenie przepływu powodującego zerwanie wierzchniej, obrukowanej warstwy dna. Następnie określono przebieg procesów korytotwórczych w wybranych odcinkach rzek za pomocą indeksu formy korytowej oraz parametru określającego potencjalną intensywność przepływu materiału wleczonego. Zgromadzone dane zostały poddane ocenie parametrycznej.

WALORYZACJA HYDROMORFOLOGICZNA RZEK GÓRSKICH

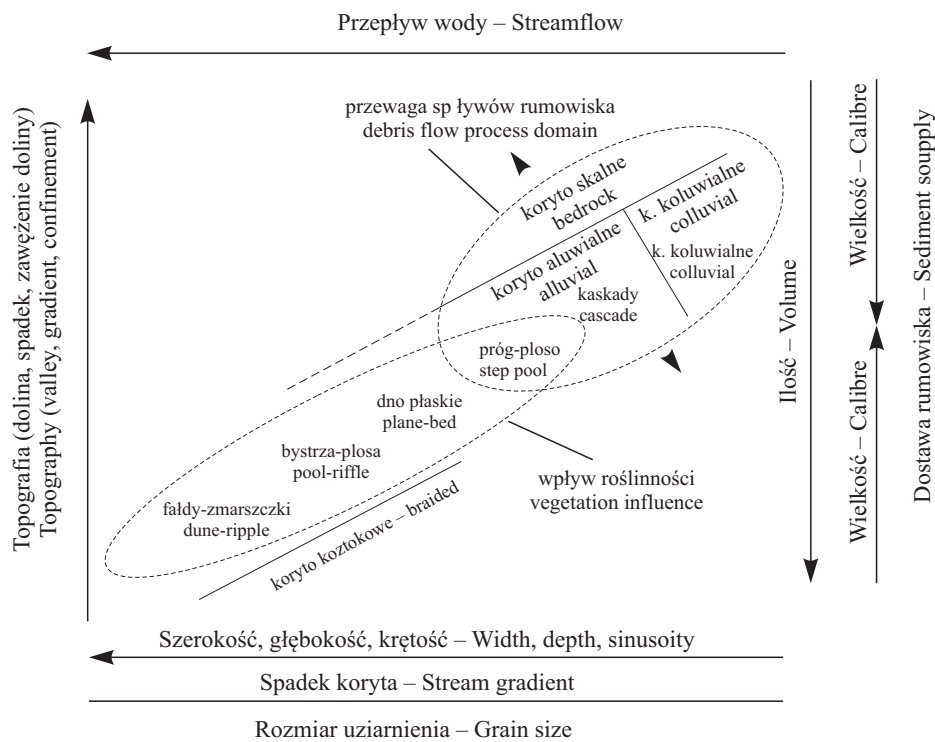
Świadomość potrzeby poprawienia jakości ekologicznej rzek zaowocowała w Europie powstaniem Ramowej Dyrektywy Wodnej [2000] (RDW). Mimo że RDW nie wymaga wykonania waloryzacji hydromorfologicznej, kiedy stan biologiczny i fizykochemiczny rzeki jest dobry lub bardzo dobry [Kulesza i Walczykiewicz 2006],

w celu parametryzacji procesów fluwialnych taka ocena jest wymagana. W przeciwnym razie nie znamy powodów przyczyn decydujących o tym, że bardzo dobry stan istnieje, oraz nie potrafimy wyjaśnić, czy stan ten jest trwały. W Polsce powstało wiele schematów pozwalających sparametryzować hydromorfologicznie rzeki nizinne [Ilnicki i Lewandowski 1997, Adynkiewicz-Piragas 2006, Oglęcki 2006], jednakże całościowa metoda waloryzacji hydromorfologicznej rzek i potoków górskich nie jest ciągle gotowa [Gręplowska i Żołnacz 2006, Wyżga i in. 2008, Radecki-Pawlik 2011]. Wprowadzenie normy EN-14614 [2005] jest jedynie krokiem przybliżającym końcowe rozwiązanie. Na uwagę zasługuje oparta na normie PL EN 14614 propozycja oceny hydromorfologicznej rzek górskich w pięciostopniowej skali przedstawiona przez Radeckiego-Pawlika [2011], która waloryzuje rzekę pod względem atrakcyjności siedliska. Spośród stosowanych w Europie metod waloryzacji hydromorfologicznej najbardziej znana i promowana jest metoda RHS, która, niestety, dość pobieżnie określa intensywność procesów fluwialnych [Newson 2002]. W literaturze światowej przyjmuje się istnienie kilku typów rzek wyszczególnionych m.in. przez Churcha, Rosgena, Mollarda, Brice'a czy Schumma [Żelazo i Poppek 2002, Fuller 2007, Buffington i Montgomery 2013]. Mimo że np. typologia zaproponowana przez Rosgena [1994] wywołała dyskusję w świecie naukowym [Miller i Ritter 1996], rozpowszechniła się i jest szeroko cytowana. Do jej akceptacji może skłaniać wcześniejsza praca Howarda [1965] uzależniająca dynamikę i równowagę cieków przede wszystkim od ciągłości (niezmienności w profilu podłużnym) podłoża, po którym on płynie. W Polsce jedną z bardziej dopracowanych i docenionych metod służących do określenia struktury rzek i potoków górskich jest metoda kartowania opracowana w Instytucie Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ [Krzemień 2012]. Metoda ta pozwala na wyznaczenie hydromorfologicznie podobnych odcinków rzek i ich dokładną charakterystykę geomorfologiczną. Do metody eksperckiej nadaje się arkusz oceny hydromorfologicznej zaproponowany przez Bartnika i Florka [2000]. Analiza równowagi hydrodynamicznej rzek górskich [Strużyński i in. 2013b] pozwala na określenie intensywności podstawowych czynników wpływających na wytworzenie koryta zrównoważonego którymi są [Pitlick i in. 2007]:

- spadek koryta rzeki,
- wielkość i dynamika przepływów,
- wielkość dostawy rumowiska.

Czynniki te mogą się zmienić na skutek transformacji zlewni, jej przekształceń spowodowanych przez człowieka albo zmian klimatycznych i towarzyszących im zmian warunków siedliskowych. W zależności od wielkości przekształcenia występuje szereg natychmiastowych i opóźnionych reakcji koryta. Najmniejsze zmiany powodują odpowiedź w postaci modyfikacji uziarnienia. Potem dochodzi do zmian form dennych, a wkrótce – głębokości oraz szerokości przekroju poprzecznego. Następnie rzeka wypracowuje nowy spadek, co związane jest głównie ze zmianą jej biegu. Doprowadzić to może do zmian parametrów koryta rzeki (rys. 1).

W źródłowych odcinakach potoków górskich mogą występować koryta koluwalne. Ten typ koryt znajduje się w tzw. kotle zbiorczym na stromych zboczach. W Polsce można się ich spodziewać przede wszystkim w Tatrach, gdzie następuje grawitacyjne przemieszczenie rumowiska. Nieco poniżej, już w korytach aluwialnych, przy spadkach 5–20%, tworzą się koryta kaskadowe. Przy spadkach 2–10% można zaobserwować istnienie



Rys. 1. Schemat podziału morfologicznego koryt w skali odcinka rzeki [Buffington 2012]
 Fig. 1. Scheme of the reach-scale channel morphology [Buffington 2012]

koryt typu próg-płosa, a niżej, gdy spadek koryta waha się pomiędzy 0,1% a 6%, można spotkać dno płaskie. W podobnych warunkach (spadki 0,1–6 %) funkcjonują koryta typu bystrze-płosa i koryta typu roztokowego, choć te ostatnie zdarzają się nawet przy spadkach charakterystycznych dla rzek nizinnych. Aby nieco dokładniej określić, jaki charakter powinna mieć rzeka góraska, na specjalnie przygotowanym nomogramie wyznacza się położenie punktu, którego rzędną określa wskaźnik intensywności przepływu (*flow intensity*), a odcięta – indeks formy korytowej (*channel form index*), (rys. 2) [Buffington i in. 2003]. Przedstawione wielkości obliczane są z następujących równań:

$$\begin{aligned} \text{indeks formy korytowej} &- I \cdot B \cdot H^{-1} [-], \\ \text{intensywność przepływu} &- u^* \cdot u_{gr\ d50s}^{*-1} [-], \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- I – spadek,
- B – szerokość zwierciadła wody dla przepływu brzegowego,
- H – napełnienie dla przepływu brzegowego,
- u^* – prędkość dynamiczna dla przepływu brzegowego,
- $u_{gr\ d50s}^*$ – graniczna prędkość dynamiczna dla ziaren o średnicy $d_{50\%}$ zmierzonej w wierzchniej warstwie dna.

Należy podkreślić, że granice na rys. 2 nie odzwierciedlają zastanych form korytowych, lecz występujące w danym odcinku rzeki tendencje hydromorfologiczne (procesy fluwialne wytwarzające określoną formę koryta). Są one bowiem wyznaczone na podstawie chmur punktów zmierzonych w terenie przez wielu badaczy, opisujących zależność intensywności przepływu od indeksu formy korytowej w bardzo różnorodnych korytach rzek. Niestety, granice zasięgu chmur punktów zakwalifikowanych do poszczególnych grup są dość mocno rozmyte i nakładają się na siebie [Buffington i in. 2003]. Interesujące, że w podobnych warunkach przepływu, w przypadku gdy dno w rzece jest piaszczyste, wytwarzane są w nim formy denne typu zmarszczek i wydm w podobnych warunkach przepływu jak dla rzek roztokowych z materiałem grubym. Ciekawostką mogą być również badania form dennych w korytach żwirowych, tworzących się w odcinkach ujściowych rzek górskich [Opoka-Słowik i Radecki-Pawlik 2006]. Przedstawiona na rys. 1 kwalifikacja koryt uwidacznia, jak łatwo wszystkie typy koryt rzek górskich z aluwialnych mogą stać się skalnymi. Zmniejszenie dostawy rumowiska, zwiększenie dynamiki przepływów lub co gorsza, wystąpienie obu tych czynników jednocześnie, może spowodować usunięcie aluwioów i docięcie koryta do podłoża skalnego [Korpak i in. 2008, Korpak 2010, Gorczyca i inni 2011, Wyźga i Radecki-Pawlik 2011].

POJEMNOŚĆ KORYTOWA RZEK GÓRSKICH A WARUNKI RÓWNOWAGI HYDRODYNAMICZNEJ

Stan równowagi hydrodynamicznej jest wynikiem zrównoważonego stanu ciekłu, tzn. zachowania funkcji retencji w zlewni oraz zbilansowania transportu rumowiska dennego. Ocena warunków równowagi hydrodynamicznej polega na porównaniu ilości materiału doprowadzanego do i odprowadzanego z danego odcinka rzeki górskiej [Bartnik i in. 2007]. W przypadku występowania równowagi hydrodynamicznej ubytki rumowiska zostają z czasem uzupełniane, np. podczas opadania fali wezbraniowej albo podczas przepływów wód średnich. Różne źródła materiału do koryta powodują zróżnicowaną dystrybucję dostaw. Materiał dostarczany ze zboczy może pojawiać się niezależnie od wezbrań i zostaje rozdystrybuowany przez rzekę w czasie powodzi. W rzekach górskich rumowisko pochodzące z erozji dna i brzegów jest dostarczane i uruchamiane okresowo, gdy pojawiają się wysokie stany wód. W zależności od rodzaju głównej dostawy rzeka w sposób dynamiczny może zmieniać skład granulometryczny materiału wlezonego. W przypadku zbyt długiego okresu zmniejszenia alimentacji rumowiska dochodzi w końcu do zachwiania równowagi hydrodynamicznej. W takich korytach transport potencjalny jest znacznie większy od istniejącego. Gdy zostaje zerwane obrukowanie, w przypadku braku transportu zrównoważonego następuje obniżenie koryta, które w rzekach górskich czasami bardzo gwałtownie wcina się w podłoże, co powoduje zwiększenie pojemności tegoż koryta. Proces ten może dotyczyć różnych typów rzek. Jak sugeruje schemat przedstawiony na rys. 1, w przypadku zmniejszenia się dostawy materiału wlezonego rzeka, np. roztokowa, zanim pogłębi się do koryta skalnego, może przejściowo przybrać postać rzeki typu bystrze-płoso lub, co bardziej prawdopodobne, rzeki z korytem o dnie płaskim. W przypadku gdy pierwotnie była to rzeka o korycie z układem bystrze-płoso, może ona przekształcić się w rzekę o płaskim dnie. I odwrotnie, w przypadku, gdy zwiększy się dostawa rumowiska, rzeka o płaskim dnie może przekształcić się w rzekę roztokową lub typu bystrze-płoso. Wcięcie

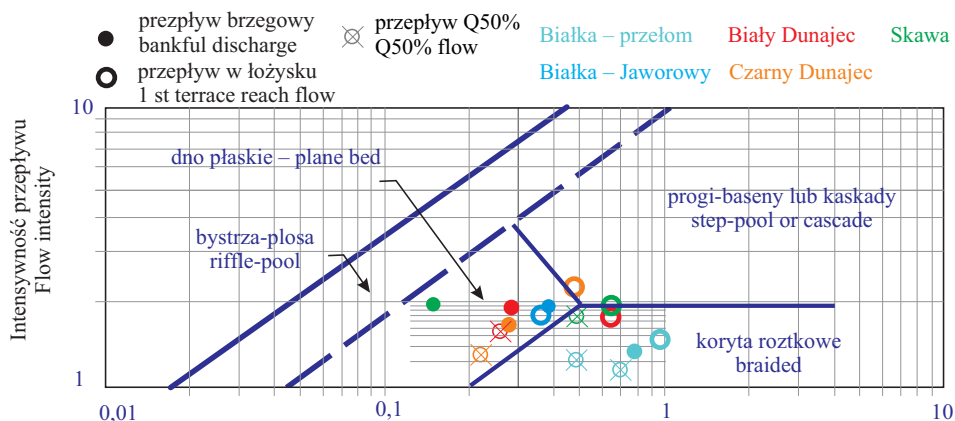
koryta jest przyczyną wielu zmian charakteru rzeki i w sposób bezpośredni wpływa na jej reżim. Niżej podano niektóre ważniejsze cechy rzek z korytami wciętymi:

- zwiększenie pojemności korytowej (w korycie mieszczą się przepływy znacznie większe od $Q_{10\%}$);
- jeżeli nie pojawią się nowe pokłady uruchamianego materiału, dno takich koryt jest silnie obrukowane; koryta wcięte są korzystne hydraulicznie, odznaczają się zmniejszonymi oporami ruchu wody podczas wezbrań;
- stają się bardzo niebezpieczne podczas powodzi z powodu panujących w nich dużych napełnień i znacznej prędkości przepływu wody;
- płyną często w korytach skalnych lub skalno-aluwialnych;
- przestają alimentować wodę w dolinie i zaczynają ją drenować, pogarszając dodatkowo pojemność retencyjną strefy przykorytowej lub, w przypadku dużych przegłębień, obszarów dalszych;
- płyną w korytach ubogich w formy hydromorfologiczne;
- ich koryta stają się mniej kręte;
- formy denne występują w nich z małą częstotliwością, w korytach takich rzek zaznacza się przede wszystkim strefa nurtu;
- koryta rzek nie wytwarzają przybrzeżnych stref pływów, basenów i innych obszarów o zmniejszonej prędkości ruchu wody, koniecznych jako schronienie oraz żerowisko dla osobników niedojrzałych i nie pozostają w kontakcie z takimi obszarami;
- koryta rzek wciętych są mniej nasłonecznione i przestają być atrakcyjnym środowiskiem dla wielu gatunków.

Należy pamiętać, że system rzeczny powiązany jest bardzo ściśle ze zlewnią. Dostawa rumowiska w naturalnych warunkach również nie musi być liniowa. Można sobie wyobrazić sytuację, w której rzeki są zasilane dużą ilością materiału niespoistego w okresach susz, po pożarach albo po masowych wylesieniach, np. na skutek ataku szkodnika czy zmian gatunkowych drzewostanu. Z tego powodu rzeki górskie mogą przez pewien okres pogłębiać swoje koryta, aż do kolejnej masowej dostawy materiału. Intensywność erozji liniowej i powierzchniowej ze stoków górskich jest również uzależniona od wielu czynników. Po wylesieniach, które wystąpiły w polskich Sudetach w latach 80. XX wieku, stoki erodowane były bardzo krótko, ponieważ rolę stabilizatora stoków przejęły inne gatunki roślin, głównie trawiastych [Bartnik i Strużyński 1998]. W zlewniach rolniczych dostawa rumowiska uzależniona jest w bardzo znacznym stopniu od intensywności upraw. W Polsce w XX oraz na przełomie XX i XXI wieku nastąpiła bardzo duża zmiana w zagospodarowaniu stoków górskich w Tatrach i Karpatach [Krzemień 1976, Korpak 2010]. Największy wpływ na procesy fluwialne występujące w rzekach mają oczywiście regulacje techniczne gdyż modyfikują zarówno spadek rzeki, jak i dynamikę przepływu oraz dostawę rumowiska.

IDENTYFIKACJA ZABURZEŃ PROCESÓW FLUWIALNYCH

W artykule przyjęto, że parametryczna ocena zaburzeń równowagi hydrodynamicznej koryt rzek i potoków górskich jest możliwa poprzez określenie przepustowości koryta rzeki i składu granulometrycznego powierzchniowej warstwy jej dna w pierwszej kolej-



Rys. 2. Nomogram reżimu przepływu oparty na równaniach (1)

Fig. 2. Regime diagram based on equations (1)

ności dla przepływów brzegowych, określanych za Pickupem i Warnerem w przedziale wód od czteroletniej do dziesięcioletniej [Radecki-Pawlik 2011]. W przypadku zdegradowanych przekrojów przedział ten nie zawsze pozwala na znalezienie położenia brzegu [Strużyński i inni 2013a]. Należy zauważyć, że w literaturze spotykane są również propozycje stosowania mniejszych przepływów (np. $Q_{67\%}$ lub $Q_{50\%}$) do określania warunków równowagi hydrodynamicznej koryt rzecznych [Bojarski i in. 2005, Strużyński 2006]. Poprzez analizę zmian indeksu tarasowego i promienia hydraulicznego możliwe jest precyzyjne określenie położenia nowego, często słabo widocznego brzegu [Strużyński i inni 2013b]. Gdy koryto mieści przepływy brzegowe, jego stan jest zrównoważony hydrodynamicznie. W przypadku gdy mieszczą się w nim wezbrania katastrofalne, np. $Q_{1\%}$ i większe, koryto jest silnie zdegradowane. Przy przepustowości koryt rzecznych pomiędzy $Q_{10\%}$ a $Q_{1\%}$, warto dodatkowo sprawdzić skład granulometryczny pokrywy oraz typ hydromorfologiczny koryta. W warunkach naturalnych wecinające się koryta wytwarzają kolejne terasy i poziomy zasięgu wód brzegowych [Repka i in. 1997, Berryman i in. 2000, Westaway 2002].

Szczegółowo metodyka wyznaczenia przepływu brzegowego oraz równowagi hydrodynamicznej koryt rzek i potoków górskich została przedstawiona przez Strużyńskiego i in. [2013a, 2013b] dla rzek karpackich. W niniejszym opracowaniu skupiono się na interpretacji wyników pomiarów przeprowadzonych na rzekach Biały Dunajec w przekroju Szafłary, Czarny Dunajec w przekroju Chochołów, Skawa w przekroju Bystra i Białka w rejonie ujścia potoku Jaworowego oraz w przekroju Przełom Białki. Na odcinkach tych nie występują budowle regulacyjne podłużne ani poprzeczne. Wyniki obliczeń hydraulicznych, prognozy stabilności dna i kwalifikacje dna koryt wykonane za pomocą równań (1) lokujących dany odcinek na rys 2. zostały przedstawione w tabeli 1. Obliczenia obu parametrów wykonano także dla wód wypełniających łóżisko rozpatrywanych rzek oraz dla przepływu $Q_{50\%}$ (rys. 2), posługując się prognozą obrukowania dna [Bartnik i Strużyński 1999].

Tabela 1. Waloryzacja procesów fluwialnych w korytach rzek karpackich
 Table 1. Evaluation of fluvial processes found in Karpathian rivers

Lp. No.	Parametr – Parameter	Rzeka – River				
		Biały Dunajec	Czarny Dunajec	Skawa	Białka, Potok Jaworowy	Białka, Przełom
1.	Przepływ brzegowy w przedziale Range of bankful discharge	$Q_{10\%} - Q_{5\%}$ 3	$Q_{25\%} - Q_{10\%}$ 4	$Q_{75\%} - Q_{50\%}$ 5	$Q_{25\%} - Q_{10\%}$ 4	$Q_{50\%} - Q_{25\%}$ 5
2.	Zmiany indeksu formy korytowej* Channel form index changes*	dość duże quite high 4	niewielkie quite small 3	duże high 5	bardzo małe very small 1	małe small 2
3.	Typ dna Bottom type	dno płaskie flat bed	dno płaskie flat bed	dno płaskie lub bystrza i plosa flat bed or riffles and pools	dno płaskie flat bed	rzeka roztokowa braided river
4.	Tendencje podczas powodzi* Flooding flow tendencies*	rzeka roztokowa braided river 4	dno płaskie, progi flat bed steps 4	nowe ramiona, progi new branches, steps 4	dno płaskie flat bed 5	rzeka roztokowa braided river 5
5.	Przepływ w łózysku Channel capacity	$Q \approx Q_{1\%}$ 2	$Q \gg Q_{1\%}$ 1	$Q_{25\%} - Q_{10\%}$ 5	$Q_{25\%} - Q_{1\%}$ 3	$Q_{25\%} - Q_{10\%}$ 5
6.	Przepływ zrywający obrukowanie Bed flushing flow	$Q_{25\%}$ 4	$Q_{5\%}$ 2	$Q \approx Q_{50\%}$ 5	$Q_{10\%}$ 3	$Q_{1\%}$ 1
7.	Zmiany intensywności przepływu* Flow intensity changes*	maleje decreases 4	rośnie increases 1	stabilna stable 5	maleje decreases 4	rośnie increases 2
8.	Identyfikacja jakości i zaburzeń procesów fluwialnych (ocena subiektywna)** Identification of the quality and disturbances of fluvial processes (subjective mark)**	A3, B3, C2, D2, E2	A2, B4, C4, D3, E4	A1, B1, C1, D1, E1	A1, B2, C3, E1	A1, B1, C4, E2
9.	Ocena stanu koryta Valuating of the river channel Lp. – No. 1, 2, 3–4 i 5	13/4 3	12/4 3	19/4 5	13/4 3	17/4 4
10.	Ocena równowagi hydrodynamicznej Evaluating of the channel hydrodynamical balance Lp. – No. 5, 6 i 7	10/3 3	4/3 1	15/5 5	10/3 3	8/3 3

Ocena zaburzeń procesów fluwialnych						
Evaluating of the fluvial processes disturbances						
11.	Lp. – No. 8–10, od 5 brak do 1 bardzo silne zaburzenia – from 5 none to 1 very strong disturbances	9/3 3	6/3 2	5/3 5	11/3 4	11/3 4

* dotyczy zmian przepływu od brzegowego do wypełniającego łożysko – meets flow change in range from bank-full discharge to the terrace flooding flow,

** A1 – koryto dobrze zlokalizowane w dolinie – bed vertical localization good; A2 – koryto dobrze wyróżnia się w łożysku – bed well seen in the channel; A3 – koryto wcięte – bed incised; B1 – łożysko o właściwej przepustowości – channel capacity normal; B2 – łożysko nieco wcięte – channel to deep; B3 – łożysko nisko położone – channel incised; B4 – łożysko bardzo głębokie – channel highly incised; C1 – rumowisko wymieszane – bed material mixed; C2 – rumowisko ruchliwe – material moveable; C3 – dno stabilne – stabile bed; C4 – dno silnie obrukowane – bed material highly armored; D1 – dostawa materiału duża – material alimentary high; D2 – dostawa materiału dobra – material alimentary good; D3 – zbyt mała dostawa materiału – material alimentary too low; D4 – brak dostawy rumowiska – no alimentary; E1 – brak tendencji do wcinania koryta – no incision tendencies; E2 – niewielka tendencja do wcinania – small incision tendencies; E3 – duża tendencja do wcinania (brak wychodni skalnych) – high incision tendencies (no visible rocks); E4 – duża tendencja do wcinania (zaobserwowano wychodnie skalne) – high incision tendencies (rocks appear).

Dzięki prognozie zmian składu granulometrycznego materiału dennego określono właściwą średnicę $d_{50\%}$ rumowiska tworzącego pokrywę dna dla wszystkich przepływów charakterystycznych. Obliczenia te wskazują, że procesy korytotwórcze w Białym Dunajcu, w Czarnym Dunajcu oraz w Białce w rejonie Przełomu charakteryzują się podobnymi tendencjami niewielkich zmian dla przepływów od $Q_{50\%}$ do przepływu brzegowego. Jedynie w korycie rzeki Skawy następuje duża zmiana parametrów hydraulicznych, ze względu na rozlanie wód na terasę zalewową, a parametry ruchu materiału wleczonego znacząco się nie zmieniają. Reżim przepływu wody wyznaczony dla Białki w rejonie ujścia Potoku Jaworowego zmienia się niezauważalnie. Podczas występowania przepływów rzędu $Q_{50\%}$ wszystkie przedstawione rzeki wykazują tendencję do tworzenia koryta o charakterze roztokowym.

Charakterystykom przedstawionych w tabeli 1 parametrów przypisano oceny cząstkowe i końcowe. Parametry te zostały zakwalifikowane do dwóch grup. Pierwsza grupa opisuje stan hydromorfologiczny koryt, a druga – procesy fluwialne. Pod liczbą porządkową (lp.) 1. zaprezentowano przepływy korytowe. W przypadku gdy przepływ znajdował się w granicach $Q_{25\%} - Q_{10\%}$ (zakres podany przez Pickupa i Warnera [Radecki-Pawlik 2011]), przypisana mu została wartość 4. Jeżeli były to mniejsze przepływy, otrzymywały ocenę 5, jeżeli większe – odpowiednio 3 ($Q_{10\%} - Q_{5\%}$), 2 ($Q_{5\%} - Q_{1\%}$) i 1 ($Q > Q_{1\%}$). Pod lp. 2. zestawiono zmiany indeksu form korytowych określonego dla przepływu brzegowego i wypełniającego łożysko. Największe zmiany obliczono dla Skawy, która otrzymała 5 punktów, a najmniejsze dla Białki (ujście pot. Jaworowego) – 1 punkt. Pod lp. 3. i 4. zaprezentowano kwalifikację punktów wykreślonych na rys. 2. W przypadku, gdy rzeka

podczas wezbrania nie zmieniała charakteru, otrzymywała 5 punktów, a w przypadku gdy zmiany zmierzały w kierunku form bardziej urozmaiconych – 4 punkty. Lp. 5 to charakterystyka przepustowości łożyska. Jest to bardzo ważny parametr, z jednej strony związany z istnieniem równowagi hydrodynamicznej w korycie, z drugiej zaś odzwierciedlający tendencje procesów fluwilanych i wpływający na atrakcyjność biotyczną rzeki. W przypadku gdy łożysko nie było obniżone, czyli zapewniało przepustowość dla przepływu brzegowego, kwalifikowano je najwyżej. Przy większym wcięciu przypisane zostały mniejsze wagi: 4 ($Q_{10\%} - Q_{5\%}$), 3 ($Q_{5\%} - Q_{1\%}$), 2 ($Q \approx Q_{1\%}$), 1 ($Q > Q_{1\%}$). Poniżej (lp. 6.) zamieszczono charakterystykę przepływów zrywających obrukowanie. Zbyt mała dostawa rumowiska powoduje, że rzeki wytwarzają dno obrukowane. Jest to wskaźnikiem zachwianej równowagi hydrodynamicznej. Z tego powodu koryto w którym obrukowanie nie występuje, otrzymało notę 5 (przepływ zrywający $Q \approx Q_{50\%}$). Przepływy zrywające pokrywę rzędu $Q_{25\%}$, $Q_{10\%}$, $Q_{5\%}$ i $Q_{1\%}$ otrzymały odpowiednio punktów 4, 3, 2 i 1. Ostatnim waloryzowanym parametrem jest intensywność przepływu, której zmiany również analizowano pomiędzy występowaniem przepływu brzegowego i wypełniającego łożysko (lp. 7. w tabeli 1). Jest to również parametr opisujący intensywność procesów fluwalnych, ponieważ określa nadwyżkę energii potencjalnej w korycie. Kiedy wartość intensywności przepływu nie zmieniała się podczas wezbrania, oznaczało to, że dostawa rumowiska do przekroju jest właściwa (5 punktów). Gdy zmniejszała się ona podczas wezbrania (możliwość akumulacji w przekroju, pojawianie się odsypisk), przypisano jej wartości 4 lub 3, a kiedy się zwiększała (możliwość procesów erozyjnych, wcinania koryta) – wartość 2 lub 1.

WYNIKI BADAŃ

Biały Dunajec (oceny 3, 3, 3 pod lp. od 9. do 11.) w rejonie Szaflar jest nieuregulowany, choć nieco powyżej znajduje się mała elektrownia wodna, a poniżej wykonano korekcję progową. Rzeka jest na tym odcinku narażona na zmniejszenie dostaw materiału wleczonego w powyższych przekrojach. Z tego powodu jest już rzeką dość mocno wcięta w podłoże. Rumowisko pobierane jest przez rzekę z erozji brzegów, co powoduje że zarówno stan koryta, jak i ocena równowagi hydromorfologicznej jest na poziomie średnim.

Czarny Dunajec w przekroju Chochołów (oceny 3, 1, 2) jest rzeką mocno wcięta w podłoże. Miejscami pojawiają się już wychodnie skalne. Ocena stanu koryta jest dość wysoka i odzwierciedla istnienie wyraźnie zaznaczającego się brzegu. Koryto jest jednak położone głęboko poniżej terasy zalewowej i rzeka nie ma możliwości wystąpienia z łożyska. Z tego powodu ocena równowagi hydrodynamicznej rzeki jest najniższa z możliwych. Można się zastanawiać, dlaczego Czarny Dunajec w tym odcinku jest tak mocno wcięty, ponieważ powyżej nie wykonano regulacji poprzecznej, zatrzymującej rumowisko. Ocena wykonana w tabeli 1 odzwierciedla jednak zły stan faktyczny rzeki.

Skawa powyżej ujścia Bystrzanki (oceny 5, 5, 5). Rzeka w wyżej leżących przekrojach płynie w korycie wciętym. Możliwe, że dobry stan tego odcinka Skawa zawdzięcza cofce powstałej w wyniku dość dużego dopływu. Faktem jednak jest, że koryto rzeki w tym odcinku zachowało się w bardzo dobrej formie. W porównaniu z pozostałymi odcinkami rzek ten odcinek charakteryzuje się najlepiej wykształconym układem bystrzy i plos, co jest zgodne z jej umiejscowieniem na rys. 2. Dodatkowo rzeka łatwo może

rozlewać się podczas wezbrań i uruchamiać materiał wleczony, co gwarantuje wytwarzanie różnorodnych form korytowych, lubianych przez ryby i inne stworzenia wodne.

Białka w rejonie ujścia Potoku Jaworowego (oceny 3, 3, 4) płynie w korycie stabilnym. Materiał uruchamiany jest z wielką trudnością. Jest to odcinek bardzo dynamiczny rzeki płynącej po świeżym i obtoczonym materiale skalnym wyerodowanym z Tatr. Właściwie odcinek ten można scharakteryzować jako naturalny. Niska ocena wskazuje, że przedstawiony w tabeli 1 schemat waloryzacji zanizła jakość Białki z powodu jej małej różnorodności hydromorfologicznej.

Białka w rejonie Przełomu (pod Krempachami) (oceny 4, 3, 4) to początek odcinka wyraźnie roztokowego. Rzeka zachowała jeszcze bieg bliski naturze, choć jest lewostronnie obwałowana. Jej koryto w rejonie przełomu w roku 2010 zostało przegłębione za pomocą ciężkich maszyn. Ponadto z koryta, łożyska i terasy odbywa się pobór rumowiska – często w sposób niekontrolowany. Niepokojącym symptomem jest silne obrukowanie koryta oraz zbliżone do Czarnego Dunajca tendencje zmian indeksu intensywności przepływu podczas wezbrań (rys. 2). Jeżeli obliczone parametry poprawnie zakreślają trend dla tego odcinka, Rezerwat Krajobrazowy „Przełom Białki” może wkrótce stracić ważny element, jakim jest rzeka roztokowa płynąca pomiędzy skałami Obłazową i Kremską.

WNIOSKI

Wyniki oceny stanu i możliwych tendencji w korytach rzek górskich pozwalają na zidentyfikowanie procesów fluwialnych przeważających na danym odcinku rzeki. Wskazują one na istnienie lub brak równowagi hydrodynamicznej koryta.

Za pomocą indeksu form korytowych oraz współczynnika intensywności przepływu można ustalić zależność procesów kształtujących właściwe formy koryt rzecznych od wielkości i dynamiki przepływów.

Zastosowanie prognozy stabilności dna oraz wyżej wymienionych indeksów, uwidocznionych na diagramie reżimu przepływu (rys. 2), pozwala poprawnie określić istniejące procesy korytotwórcze oraz zmiany form korytowych, do których te procesy są w stanie doprowadzić.

Biały Dunajec w rejonie Szaflar, Czarny Dunajec w rejonie Chochołowa i Białka poniżej ujścia Potoku Jaworowego są rzekami, które wykształciły dno płaskie. Skawa powyżej ujścia Bystrej to rzeka, w której reżim przepływu sprzyja uformowaniu układu bystrze-płoso, a Białka w rejonie przełomu wytwarza koryto roztokowe.

Zastosowana metoda pozwoliła na klasyfikację badanego odcinka Skawy jako rzeki płynącej w warunkach bliskich naturze, a odcinków Białego Dunajca, Czarnego Dunajca i Białki w rejonie przełomu jako zagrożonych. Szczególnie zagrożony wydaje się omawiany odcinek Czarnego Dunajca. Białka w rejonie ujścia Potoku Jaworowego jest rzeką bliską naturze. Ze względu na dużą dynamikę przepływów i znaczny spadek wytworzyła obrukowane koryto pokryte głazami, które silnie stabilizują dno.

Wykonane obliczenia i interpretacja wyników wskazują na zagrożenia równowagi hydrodynamicznej Białki w rejonie przełomu oraz Czarnego i Białego Dunajca. W rzekach tych zachwiana została równowaga pomiędzy dynamiką przepływu wody i dostawą rumowiska.

Aby przywrócić warunki równowagi hydrodynamicznej i zatrzymać nadmierną erozję, należy zapewnić tym rzekom możliwość erodowania brzegów i zwiększyć ogólną ilość dostawy materiału wleczonego. Częściowe rozwiązanie problemu można osiągnąć poprzez zaprzestanie poboru materiału z łóżysk i koryt tych rzek oraz poprzez rozbiórkę umocnień brzegów. Ważne jest również, aby wstrzymano zabiegi techniczne polegające na okresowym pogłębianiu i prostowaniu koryt tych rzek, a zwłaszcza Białki w jej środkowym i dolnym biegu.

Możliwe jest również zmniejszenie energii przepływającej wody poprzez zwiększenie krętości rzek. Zmniejszenie spadku w sposób bezpośredni wpływa zarówno na parametr opisujący intensywność przepływu, jak i na zmiany indeksu korytowego. Również prognoza zmian krzywej granulometrycznej wskazuje na zmniejszenie zapotrzebowania rzeki na materiał wleczony w czasie wezbrań. Rzeki kręte mają słabsze tendencje do wcinania się w podłoże i w sposób naturalny wytwarzają szersze i płytsze koryta.

Ponieważ w chwili obecnej na obszarach zabudowanych przeważnie nie ma możliwości oddania rzekom odpowiednio szerokiego pasa migracyjnego, wewnątrz którego mogłyby zmieniać swój bieg po wezbraniach, w przypadku rzek uregulowanych możliwe jest zmniejszenie energii przepływającej wody poprzez wykonanie kaskady wykonanej, np. za pomocą ramp. To rozwiązanie pociąga jednak za sobą co najmniej dwa zagrożenia. Po pierwsze przenosi problem niedostatku rumowiska do niżej położonych odcinków, a po wtóre pozostawia niepewność związaną z możliwością eskalacji problemu w przypadku wystąpienia przepływu większego od projektowego.

W przypadku obliczeń wykonanych dla wyżej wymienionych odcinków rzek metoda przedstawiona w artykule wydaje się dawać poprawne wyniki. Należy jednak dokonać jej weryfikacji dla większej liczby przypadków. Nie sprawdzono również, czy można zastosować przedstawioną metodę do waloryzacji rzek uregulowanych.

PIŚMIENNICTWO

- Adynkiewicz-Piragas M., 2006. Hydromorfologiczna ocena cieków wodnych w krajach Unii Europejskiej jako element wspierający ocenę ekologicznego stanu rzek zgodnie z wymogami Ramowej Dyrektywy Wodnej. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/3, 7–15.
- Bartnik W., Florek J., 2000. Ocena warunków równowagi hydrodynamicznej potoku górskiego na podstawie analizy hydraulicznych parametrów przepływu. *Zesz. Nauk AR Krak., ser. Inżynieria Środowiska* 20, 163–175.
- Bartnik W., Majewski W., Łapuszek M., Ratomski J. 2007. Ocena równowagi hydrodynamicznej Dolnego Dunajca w warunkach pracy elektrowni wodnych. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/1, 21–37.
- Bartnik W., Strużyński A., 1998. Monitoring obszaru Gór Izerskich wylesionych w wyniku antropopresji przemysłowej. *Konf. Nauk.-Techn. Zagrożenie Klęskami Żywiotowymi*. Wyd. Nauk. PWN Kraków 1998, 337–344.
- Bartnik W., Strużyński A., 1999. Determining hydrodynamic balance in Mountain stream floods. 3rd Internat. Symp. on Ecohydraulics. IAHR & Utah State University Salt Lake City, CD-ROM.
- Berryman K., Marden M., Eden D., Mazengarb C., Ota Y., Moriya I., 2000. Tectonic and paleoclimatic significance of Quaternary river terraces of the Waipaoa River, east coast, North Island, New Zealand. *New Zeal. J. Geol. Geophys.* 43, 229–245.
- Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyźga B., Zalewski J. 2005. *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*. Ministerstwo Środowiska, Departament Zasobów Wodnych Warszawa.

- Buffington J.M., 2012. Changes in channel morphology over human time scales. [W:] Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments. Red. M. Church, P.M. Biron, A.G. Roy. Wiley Chichester, 435–463.
- Buffington J.M., Woodsmith R.D., Booth D.B., Montgomery D.R., 2003. Fluvial processes in Puget Sound Rivers and the Pacific Northwest. [W:] Restoration of Puget Sound Rivers. Red. D.R. Montgomery, S. Bolton, D.B. Booth, L. Wall. University of Washington Press Seattle.
- Buffington, J.M., Montgomery D.R., 2013. Geomorphic classification of rivers. [W:] Treatise on Geomorphology 9 Fluvial Geomorphology. Red. J. Shroder, E. Wohl. Academic Press San Diego, CA, 730–776.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Ramowa Dyrektywa Wodna).
- Fuller I., 2007. River and channel morphology. Technical Report prepared for Horizons Regional Council. Measuring and monitoring channel morphology. Geography Programme School of People, Environment & Planning. Report 2007/EXT/773. Massey University Palmerston North.
- Gorczyca E., Krzemień K., Łyp M. 2011. Contemporary trends in the Białka River channel development in the Western Carpathians, *Geographia Polonica*, 84, Special Issue Part 2, 39-53, 2011
- Gręplowska Z., Żołnacz J. 2006. Wstępna ocena metod waloryzacji morfologicznej rzek na przykładzie zlewni Raby. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/3, 37–44.
- Howard A.D., 1965. Geomorphological systems – equilibrium and dynamics. *Amer. J. Sci.* 263, 302–312.
- Ilnicki P., Lewandowski P., 1997. *Ekomorfolologiczna waloryzacja dróg wodnych Wielkopolski*. Wyd. Nauk. Bugucki Poznań.
- Korpak J., 2010. Geomorphologic effects of river engineering structures in Carpathian fluvial systems. *Landform Analys.* 14, 34–44.
- Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A., 2008. Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpaccich. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4, ss. 89.
- Kulesza K., Walczykiewicz T. 2006. Podstawy metodyczne i narzędzia dla prowadzenia monitoringu hydromorfologicznego stanu rzek i potoków. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/1, 185–196.
- Krzemień K., 1976. Współczesna dynamika koryta potoku Konina w Gorcach. *Folia Geogr., Ser. Geographica-Physica* 7, 87–122.
- Krzemień K. (red.), 2012. *Struktura koryt rzek i potoków (Studium metodyczne)*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ Kraków, ss. 143
- Miller J.R., Ritter J.B., 1996. Discussion – An examination of the Rosgen classification of natural rivers. *Catena* 27, 295–299
- Newson M.D., 2002. Geomorphological concepts and tools for sustainable river ecosystem management. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 12: 365–379
- Ogłęcki P., 2006. Ocena hydromorfologiczna rzek nizinnych na przykładzie rzeki Wkry. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/1, 175–184
- Opoka-Słowik E., Radecki-Pawlik A. 2006. Wybrane parametry hydrauliczne w obrębie wydm zwirowych języko-kształtnych znalezionych w ujściowym odcinku rzeki Raby. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/2, 159–172.
- Pitlick J., Mueller E.R., Segura C., Cress R., Torizzo M., 2007. Relation between flow, surface-layer armoring and sediment transport in gravel-bed rivers. *Earth Surf. Proc. Landf.* 33, 1192–1209
- PN-EN 14614:2005. Jakość wody. Przewodnik oceny hydromorficznych cech rzek.
- Radecki-Pawlik A., 2011. *Hydromorfologia rzek i potoków górskich*. Wyd. Uniwersytetu Rolniczego Kraków 2011, ss. 288.
- Repka J.L., Anderson R.S., Finkel R.C., 1997. Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah. *Earth Planet. Sci. Letters* 152, 59–73.
- Rosgen D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169–199.

- Strużyński A., 2006. Skutki powodzi roztopowej w roku 2006 w uregulowanym odcinku delty śródlądowej rzeki Nidy. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 4/1, 235–247.
- Strużyński A., Kulesza K., Strużyński M., 2013a. Bed Stability as a Parameter Describing the Hydromorphological Balance of a Mountain River. [W:] *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems*. Red. R. Rowinski. Springer-Verlag Berlin – Heidelberg, 249–251
- Strużyński A., Bartnik W., Kulesza K., Czoch. K., 2013b. Równowaga hydrodynamiczna ważnym parametrem kształtującym stan ekologiczny cieków karpaccich. *Rocz. Ochr. Środ.* 15, 2591–2610.
- Westaway R., 2002. Long-term river terrace sequences: Evidence for global increases in surface uplift rates in the Late Pliocene and early Middle Pleistocene caused by flow in the lower continental crust induced by surface processes. *Netherl. J. Geosci. – Geologie en Mijnbouw* 81(3–4), 305–328.
- Wyźga B., Amirowicz A., Radecki-Pawlik A., Zawiejska J., 2008a. Zróżnicowanie hydromorfologiczne rzeki górskiej a bogactwo gatunkowe i liczebność ichtiofauny. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 2, 273–286.
- Wyźga B., Radecki-Pawlik A. 2011. Jak zmniejszyć zagrożenie i ryzyko powodziowe w dorzeczu górnej Wisły? *Gospod. Wod.* 10, 414–421
- Żelazo J., Popek Z., 2002. *Podstawy renaturyzacji rzek*. Wyd. SGGW Warszawa.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.11.2013