

Recentné morfológické zmeny slovenských vodných tokov Belá a Ondava v Západných Karpatoch od druhej polovice 20. storočia

Miloš RUSNÁK, Anna KIDOVÁ

Recent morphological changes of the Slovak rivers Belá and Ondava in Western Carpathians since the second half of the 20th century

Abstract: The changes in river morphology result from several factors such as climate, human interventions, lithology or land use and land cover changes. This paper shows morphological changes of two different river systems (braided-wandering of Belá and sinuous gravel bed of Ondava) over the last 60 years as a response to changes of land use, flood events distribution changes and human impact in the basins. Methodological framework is based on analysis of aerial photographs from seven time horizons during the 1949 – 2009 period, and analysis of hydrological data (maximal annual discharges). General trend of evolution of the river planforms is characterised by sinuous channel degradation, i.e. narrowing and straightening as well as multi-thread planform simplification. The possible hypothesis was that the behaviour of the braided-wandering Belá River represents a situation close to a threshold – degrading behaviour of a multichannel river system. In the long-term consideration, simplification of the originally unfolded braided channel pattern and progressive transformation into the wandering type was expected. Extreme discharges in the sinuous gravel-bed river induce considerable shifts of river banks and channel migration. Gradual loss and destruction of the area along the concave bank and deposition of material on the opposite bank were the processes that control the river flow along the stream. Flood events with recurrence interval of 10-years are significant for local geomorphic reworking of the studied river systems.

Keywords: channel degradation, floods, aerial photographs, GIS, long-term evolution

Úvod

Morfológické zmeny a rekonštrukcia vývojovej trajektórie korýt je vo svetovej literatúre široko rozpracovaná, pričom autori uvádzajú niekoľko faktorov, ktoré vedú k zmenám správania sa riečnych systémov od konca 19. storočia (Hajdukiewicz et al. 2017). Zameriavajú sa pritom na poznávanie funkčných vzťahov medzi fluvialnými formami a procesmi, ako aj na zmeny jednotlivých faktorov a krajiny v konkrétnom prostredí, v ktorom sa nachádzajú, pričom je veľmi ťažké identifikovať konkrétny vplyv daného faktora (Liébault a Piégay 2002). Medzi hlavné faktory, ktoré ovplyvňujú morfológiu korýt patria predovšetkým zmeny klímy (zmena teplôt, rozloženie zrážok a povodní) a antropogénne faktory, ktoré vplyvajú na zmeny v množstve sedimentov a vedú k zarezávaniu alebo aggradácii koryta. Brookes (1994) a Gregory (2006) sem zaraďujú predovšetkým priame vplyvy človeka (regulácia, výstavba priehrad, zmeny koryta, inžinierske úpravy tokov, ťažba štrkov a piesku, odstraňovanie ripariálnej vegetácie, zvyškov dreva) a nepriame zásahy, ako sú zmeny vo využití zeme (odlesňovanie, zalesňovanie, zmeny poľnohospodárskych praktík, zastavanie územia, ťažobné aktivity).

Viacerí autori poukazujú na zmeny v správaní sa riek na konci 19. storočia, ktoré sú spájané práve s koncom chladnejšej periódy, poklesom humidity a intenzity meteorologických a hydraulických procesov, a tým aj so zmenou morfológických procesov vo vodnom

toku (Kotarba 1989, Surian 1999, Liébault a Piégay 2002). Bauch a Hickin (2011) zdôrazňujú vzájomný vzťah medzi zmenami klímy, hydrologickým režimom a geomorfológiou korýt. Nárast veľkosti a trvania povodní je hlavným faktorom akcelerácie korytových zmien. Pekárová et al. (2003, 2010) poukazujú na cyklický charakter povodňových prietokov, ich objavovanie sa v období s intenzívnejším výskytom povodní a naopak. Gurnell a Petts (2002) poukazujú na zmenu viacerých vodných tokov v Európe zo štrkonosných, divočiach a migrujúcich tokov na stabilné, zarezané jednoduché korytá ako výsledok zmeny klímy (koniec malej doby ľadovej) a intenzívnych zásahov človeka do krajiny. Wyžga (1991, 1993, 1996, 2001a, 2001b), Lach a Wyžga (2002), Zawiejska a Wyžga (2010) vo svojich prácach spájajú degradáciu a zarezávanie koryta riek v poľských Karpatoch so zalesňovaním povodia, inžinierskymi zásahmi do koryta a ťažbou štrkov. V severovýchodnom Taliansku je viditeľný trend zužovania a zrezávania sa pôvodného širokého divočiaceho koryta a jeho premena na migrujúci alebo jednoduchý typ koryta antropogénnymi zásahmi a ťažbou sedimentov (Surian et al. 2009, Rinaldi et al. 2005, Surian a Rinaldi 2003). Vo Francúzku (Liébault a Piégay 2002) transformáciu tokov (trend premeny divočiaceho cez migrujúci na meandrujúci tok sprevádzaný zužovaním koryta) vysvetľujú zmenou klímy na konci malej doby ľadovej spolu so zalesňovaním povodia a výstavbou prehrádzok vedúcich k redukcii prísunu sedimentov. V Českej republike môžeme nájsť viacero prác identifikujúcich zmeny riečnych systémov v Moravskosliezskych Beskydách (Hradecký 2002a, 2002b, 2007, Hradecký et al. 2012, Škarpich et al. 2011, 2012, 2013, 2016, Galia et al. 2012). Škarpich et al. (2013) poukazuje na výrazné zarezanie a degradáciu koryta Morávky vplyvom antropogénnych zásahov a regulácie koryta s mierou zarezania koryta na úrovni 8 metrov za posledných 40 rokov. Škarpich et al. (2016) uvádzajú priemerné hodnoty 0,05 m/rok zarezania rieky Ostravice a za hlavné faktory transformácie riečneho systému považujú litologickú stavbu (flyš), antropogénne vplyvy (regulácia korýt, budovanie priečných prahov, výstavba priehrad), absenciu pravidelných záplav (eliminujú stabilizáciu štrkových lavíc sukcesiou) a pozitívnu akceleráciu zarezávania sústredením prietoku do úzkeho a hlbokého koryta.

Na Slovensku sa fluválnej geomorfológii, ako jednej z oblastí vedeckého výskumu geografie, začala venovať pozornosť začiatkom 50. rokov minulého storočia (Grešková a Lehotský 2009), kedy sa vodné toky stali súčasťou geomorfologického výskumu zameraného na všeobecné geomorfologické poznatky, paleografiu, kvartérnu sedimentáciu, alebo vývoj dolín. Z inžinierskeho hľadiska sa ďalej intenzívne rozvíjal najmä hydraulický a hydrologický výskum riek. Takýto prístup sa dotýkal hlavne regulácie korýt, realizácie protipovodňových opatrení a technických zásahov do vodných tokov. Po roku 2000 sa objavujú prvé práce zaoberajúce sa štúdiom morfológie riečnych geosystémov, ktoré položili teoretické a metodologické základy fluválnej geomorfológie na Slovensku (Grešková a Lehotský 2009). V poslednom období sa kladie dôraz na štúdium morfológického vývoja viacerých slovenských riek (tab. 1), pričom výskum sa zameriava na analýzy spojené s terénnym prieskumom (analýza priečných profilov, pozdĺžneho profilu, hierarchickej klasifikácie morfológie riek, hydromorfologickému prieskumu, analýze sedimentov) a distančnými metódami založenými na získavaní priestorových údajov z historických máp a leteckých snímok.

Cieľom príspevku je na príklade dvoch neregulovaných riek (Belá a Ondava) uviesť (i) nové prípadové štúdie zmien riečnych geosystémov v slovenských Západných Karpatoch, (ii) použitím údajov diaľkového prieskumu Zeme a geografických informačných systémov (GIS) zhodnotiť jednotlivé morfológické zmeny koryta a ich priestorovú dynamiku, a (iii) identifikovať vplyv distribúcie povodňových udalostí na dynamiku koryta, ako aj vplyv jednotlivých antropogénnych faktorov a environmentálnych zmien v povodí na zmeny týchto systémov.

Tab. 1. *Prehľad vodných tokov na Slovensku, ktoré boli analyzované metódami fluviálnej geomorfológie spolu so zoznamom jednotlivých použitých metód a publikovaných prác*

vodný tok	skúmaná dĺžka (km)	priem. prietok (m³.s⁻¹)	typ koryta	autor	metódy výskumu	predmet výskumu
Belá	23.6	3,5 (Podbanské)	D/M	Kidová a Lehotský (2012), Kidová et al. (2016, 2017)	ALS (1949, 1961, 1973, 1986, 1992, 2003, 2009), AP	zužovanie koryta, vplyv prietokov na zmenu morfológie koryta
Bodva	28	0,9 (Moldava nad Bodvou)	JK	Barabas, Sýkorová (2007), Barabas (2008), Barabas, Frániková (2009)	TP	vzťah medzi sklonom vodného toku a tvorba akumulčných foriem
Dudváh	85	x	M, uč	Prochádzka (2013)	AHM (1769-1785, 1810-1869)	analýza kľukatosti a vplyv tektoniky
Dunaj (pri Bratislave)	14	2024 (Bratislava)	A, uč	Pišút (1993, 1995, 1997, 2002, 2005, 2008, 2011) Novotný et al. (2007), Szmařda et al. (2008), Lehotský et al. (2010ab, 2013a)	AHM (1675, 1712 - 1886), PU ALS (1949, 1969, 1985, 1997, 2004), AS	vývoj koryta, laterálny posun, povodňové udalosti vývoj koryta, sedimentácia na nive, sedimentácia počas povodní
Dunaj (Gabčíkovo)	40	400 (Dobrohošť)	A, uč	Lehotský et al. (2013b)	ALS (1986, 1995, 2011)	vývoj koryta, sedimentácia na nive, sedimentácia počas povodní, tvorba novej nivy, nivné kapsy
Morava	12.5 5	118,7 (ústie)	M	Grešková (2002) Pišút (2006)	AHM (1769 - 1785), 1897, 1923), ALS (1985, 1992) AHM (1807, 1896, 1906, 1950)	zmeny pôdorysnej vzorky a vytváranie opustených ramien a meandrov zmeny pôdorysnej vzorky a vytváranie meandrov a zmena kľukatosti
Nitra	90	x	M, uč	Prochádzka (2013)	AHM (1769-1785, 1810-1869)	analýza kľukatosti a vplyv tektoniky
Ondava	13.2	5,73 (Stropkov)	K/M	Rusnák (2010), Lehotský et al. (2013a), Rusnák, Lehotský (2014ab)	ALS (1949, 1961, 1972, 1987, 2002, 2009), AP	laterálna erózia, migrácia koryta a posun brehov, sukcesia vegetácie, zmena morfológie koryta
Revúca	21.1	x	JK, ht	Čengerová et al. (2008)	RV, HKMR	integrovateľný výskum riečnej krajiny
Smrečianka	18.5	0,718 (Ziarska dolina)	JK, ht	Tomčíková (2007, 2008, 2013), Tomčíková, Lehotský (2009), Pišút, Tomčíková (2008)	HKMR, AHM (1773, 1803, 1823, 1829, 1866, 1869-1887), dotazník	klasifikácia vodného toku, percepčia riečnej krajiny, vývoj koryta
Studený potok	20	x	JK, ht	Lehotský, Lačka (2007), Lehotský, Grešková (2007)	HKMR, PzP	klasifikácia vodného toku
Topľa (horný tok)	33.2	1,51 (Gerlachov)	JK /K, ht	Frandofer, Lehotský (2011, 2013, 2014)	PU, ALS (1981, 1987, 2002, 2004, 2006, 2009), PP, SA	vplyv povodňových udalostí na morfológický vývoj koryta
Topľa (stredný tok)	39.8	3,018 (Bardejov)	K	Rusnák (2010), Rusnák, Lehotský (2014a), Rusnák et al. (2016)	ALS (1949, 1961, 1987, 2002, 2009), AP	laterálna erózia, migrácia koryta a posun brehov
Torysa	35	7,6 (Košické Oľšany)	K	Cebecauerová, Lehotský (2012)	ALS (1987, 2003)	vývoj krajinynej štruktúry a koryta, trendy sukcesie
Udava	38.5	x	K	Barabas et al. (2017)	PZP, morfometrická analýza	vplyv morfometrických parametrov koryta na akumulčné formy
Váh (horná časť)	23.5	23,8 (sútok s Jalovciakou)	K	Anstead, Barabas (2009, 2013)	HMP, RV	charakteristika ekologického stavu vodného toku
Váh (dolná časť)	180 39.65 X.X	x	M, uč	Prochádzka (2013), Prochádzka, Pišút (2015), Pišút et al. (2016) Lehotský a Matušicová (2014) Novotný a Cebecauerová (2016)	AHM (1668, 1728, 1749, 1772, 1775, 1812, 1828, 1831, 1769-1785, 1810-1869, 1824-1826, 1888-1906, 1955, 1956, 1976) AHM (1839, 1863, 1864, 1880), ALS (2004) ALS (1949, 1985, 2003)	analýza kľukatosti a vplyv tektoniky analýza zásahov človeka na charakter riečnej krajiny dolného Váhu vývoj krajinynej štruktúry a koryta
Vódka	6.55	x	JK, ht	Medvedová et al. (2007)	HKMR, AS, analýza DTM	podrobný geomorfologický prieskum a klasifikácia vodného toku
Vydrica	17	x	JK, ht	Grešková (2004), Grešková, Lehotský (2007), Urbánek, Novotný (2012)	HKMR, foto komparatívna metóda, geomorfologická analýza	klasifikácia vodného toku, brehová erózia, autoregulačné procesy korytovonivného systému s ohľadom na sekulárny a extrémny ročný cyklus zrážok

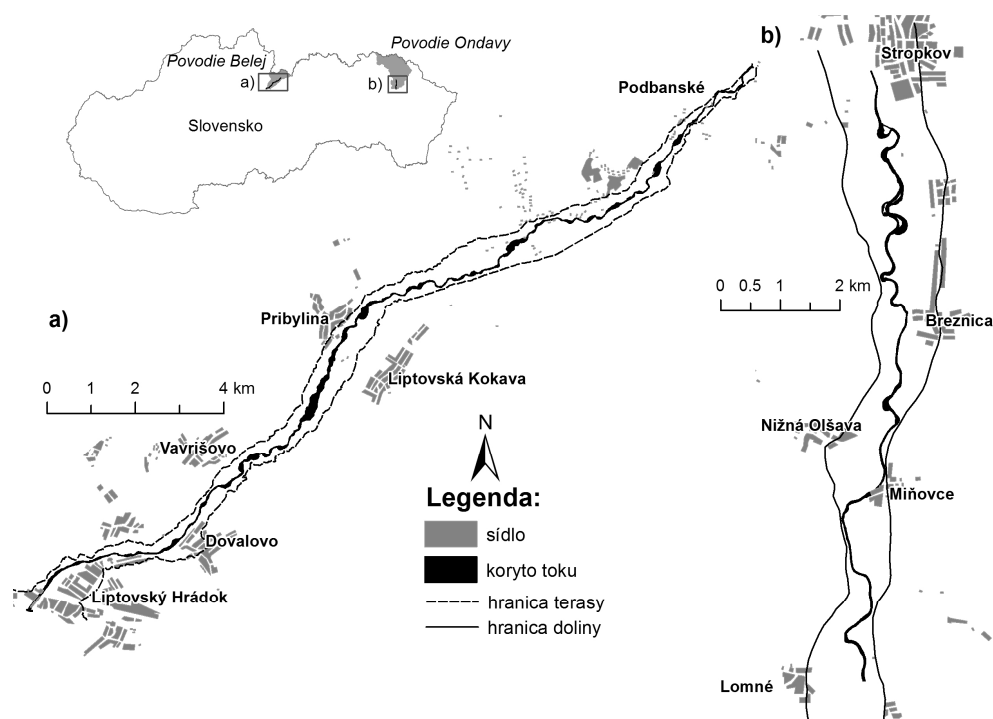
Vysvetlivky: typ koryta: D/M – divočiaco- migrujúce, JK – jednoduché koryto, K – kľukatice, M – meandrujúce, A – anastomózne, uč – koryto upravené človekom, ht – horský tok, metódy výskumu: ALS – analýza leteckých snímok, AHM – analýza historických máp, HKMR – hierarchická klasifikácia morfológie riek, AP – analýza prietokov, PU – analýza povodňových udalostí, AS – analýza sedimentov, PP – analýzy priečných profilov, PZP – analýza pozdĺžneho profilu, TP – terénny prieskum, RV – analýza ripariálnej vegetácie, HMP – hydromorfologický prieskum.

Študované územie

Všeobecná charakteristika

Sledované boli dva neregulované vodné toky na Slovensku: Belá a Ondava (obr. 1). Belá reprezentuje divočiaco-migrujúci vodný tok, ktorý vzniká sútokom Tichého a Kôprovského potoka vo Vysokých Tatrách a po sútok s Váhom dosahuje dĺžku 23,6 km. Povodie je značne asymetrické s prevládajúcimi pravostrannými prítokmi. Plocha povodia má 244 km² s maximálnou nadmorskou výškou 2 494 m n. m. a minimom vo výške 630 m n. m. Hydrologický režim je ovplyvnený snehovými zrážkami a topením snehu vo vyšších zdrojových zónach (Kidová a Lehotský 2012, Kidová et al. 2016). Priemerný ročný prietok v Podbanskom je 3,5 m³ .s⁻¹ (Majerčáková et al. 2007) a pri sútoku s riekou Váh v Liptovskom Hrádku 6,8 m³ .s⁻¹ (Šipikalová 2006).

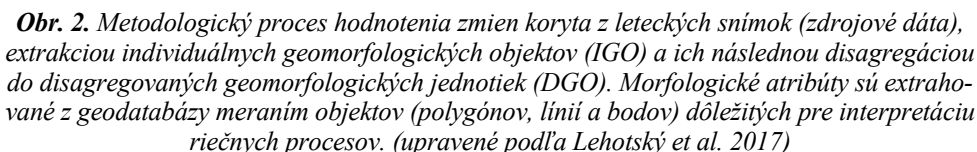
Ondava predstavuje štrkonosný, kľukatiaci a málo upravený vodný tok, ktorý prameni v Ondavskej vrchovine (obec Ondavka) a po sútok s Latoricou dosahuje dĺžku 144,4 km (obr. 2). Plocha povodia je 3 355 km² a dlhodobý priemerný prietok v stanici Stropkov je 5,7 m³ .s⁻¹ ($Q_{\max} = 550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / 19.07.1974/$). Študovaný bol riečny úsek od ústia do vodnej nádrže Veľká Domaša po mesto Stropkov v celkovej dĺžke 13,2 km.



Obr. 1. Lokalizácia skúmaných vodných tokov v rámci Slovenska: a) Belá, b) Ondava

Pre vodný tok Belá bolo na základe analýzy maximálnych mesačných a ročných prietokov získaných zo Slovenského hydrometeorologického ústavu podľa Kidovej et al. (2016) vyčlenených celkovo šesť povodňových období, pričom prietok na úrovni 16 m³ .s⁻¹, ktorý sa rovná jednoročnému prietoku, môžeme považovať za prietok plným korytom. Povodňové periódy (2003 – 2008 a 1993 – 2003) sú charakteristické približne rovnakou variabilitou maximálnych prietokov na úrovni 10-ročného prietoku a 5-ročných prietokov. Dve periódy medzi rokmi 1974 – 1992 sú charakteristické zníženou povodňovou aktivitou (prietoky na úrovni 1- až 4-ročného prietoku). Obdobie rokov 1962 – 1973 reflektuje štyri povodňové udalosti na úrovni

Na Topli sme identifikovali tri hlavné povodňové periódy. Prvá je charakteristická výskytom udalostí na úrovni 20- až 50-ročných prietokov a je ukončená povodňou z roku 1987 ($230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Táto perióda je nasledovaná obdobím so zníženou povodňou aktivitou, s prietokmi na úrovni 1- až 2-ročného prietoku medzi rokmi 1992 až 2000 (maximálny prietok $42,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Posledná perióda sa vyznačuje nárastom veľkosti a frekvencie povodňových udalostí, predovšetkým v rokoch 2004 ($N_{20} - Q_{\text{culm}} 207 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a 2008 ($N_{20} - Q_{\text{culm}} 218 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).



Belá je ovplyvnená ľudskou činnosťou na niekoľkých miestach. Ústie vodného toku do rieky Váh je zregulované v dĺžke 4 km a koryto je vedené v medzirádzovom priestore z dôvodu ochrany intravilánu mesta Liptovský Hrádok a mestskej časti Dovalovo. Tento dolný úsek toku v úseku 0-4 rkm bol zregulovaný piatimi priečnymi prahmi a celkovo za obdobie rokov 1950 až 2000 bolo z tohto úseku vyťažených 140 tis. m³ štrku. V iných častiach toku Belá od rkm 7 je

koryto zregulované iba v miestach mostov ponad rieku Belá (štyri mosty) a v lokalitách kde boli vystavané malé vodné elektrárne (MVE). Na Belej sa nachádzajú štyri MVE (úsek Vavrišovo – Pribylina medzi 5,5 – 11,5 rkm) využívajúce opustené bočné ramená, z ktorých posledná bola postavená v roku 2000.

Na Ondave prešlo koryto reguláciou v meste Stropkov, kde bola Ondava v 60. rokoch zregulovaná do úzkeho napriameného koryta s protipovodňovými hrádzami a pred ústím do VN Domaša, kde boli vybudované dva priečne prahy. Po výrazných povodňových udalostiach a laterálnej migrácii dochádza k presunu koryta do jeho pôvodnej polohy prebagrovaním štrkových lavíc a napriamením vodného toku cez štrkovú lavicu, pričom vybagrovaný materiál je uložený v podobe valov v koryte vodného toku. V sledovanom úseku Ondavy sa nachádza závod na spracovanie štrkov v obci Breznica a v Stropkove (v minulosti aj vo vtedajšej časti Stropkova – Šandal) využívajúce aj materiál z koryta vodného toku. Najväčší objem ťažby štrkov (na základe plochy ťažobných jám v koryte vodného toku) prebiehal na Ondave v roku 1981. V súčasnosti prebieha ťažba na základe povolenia vo vymedzenom úseku koryta Ondavy o objeme 1 000 m³ ročne, predovšetkým za účelom obmedzenia dotácii sedimentov do VN Domaša.

Povodie vodných tokov je v prípade Belej ovplyvnené vznikom NP TANAP v roku 1949. Vzhľadom na tvar povodia a prevládajúce prítoky z horských oblastí Západných a Vysokých Tatier došlo k postupnému ústupu pastvy dobytky v horských oblastiach a nárastu rozlohy lesa z 55,4 km² v roku 1957 na 84,9 km² v roku 2008 (Kidová et al. 2016), a to prevažne vo vyššie položených nadmorských výškach a dolinách zaradených do NP. Na poľnohospodársku činnosť boli využívané iba nižšie položené časti povodia v jeho južnej časti. Naopak povodie Ondavy je výrazne ovplyvnené poľnohospodárskou činnosťou. V 60. rokoch došlo k sceľovaniu pozemkov do ucelených lánov a postupným opúšťaním poľnohospodárskych oblastí s horšou dostupnosťou, ktorá sa prejavila nárastom plochy lesa do 70. rokov. Od 70. rokov je tak v území viditeľný postupný pokles rozlohy lesných porastov, zo 640 km² v roku 1970 na 449 km² v roku 2016.

Metodologický rámec a použité metódy

Metodologický postup je založený na extrakcii a identifikácii geomorfologických objektov vo vektorovom formáte ako priestorových jednotiek v prostredí GIS (Alber a Piégay 2011, Lehotský et al. 2017). Základným priestorovým zdrojom údajov pre identifikovanie geomorfologických foriem IGO (individuálne geomorfologické objekty) boli letecké meračské snímky (LMS) a ortofotosnímky zo siedmich časových horizontov. V prípade divočiaceho vodného toku Belá boli využité ortofotosnímky z rokov 1949, 2003 a 2009 a LMS z rokov 1961, 1973, 1986 a 1992. Pre analýzu štrkonosného, kľukatiaceho a meandrujúceho toku Ondava boli vektorizované ortofotosnímky z rokov 1949, 2002 a 2009 a LMS z rokov 1961, 1972, 1981 a 1987. Letecké meračské snímky boli ortorektifikované v prostredí Leica Photogrammetric Suite s maximálnou chybou priradenia menšou ako 0,5 m. Ortofotosnímky a LMS boli vektorizované v S-JTSK súradnicovom systéme v programe ArcGIS 10.3, kde bola využitá viacstupňová hierarchická klasifikácia geomorfologických foriem. Polohová presnosť vyčlenených foriem závisí od celkovej presnosti priradených snímok (0,5 m) a rozlišovacej úrovne pixla, ktorá sa pohybovala od 1 do 0,45 m. Vektorizácia prebiehala metódou „backdating“, kde boli zaznamenané iba zmeny, ktoré boli väčšie ako chyba, ktorá mohla vzniknúť nesprávnym priestorovým priradením. Základnou priestorovou štruktúrou bola plocha koryta (resp. plocha aktívneho koryta), ktorá bola vedená po brehovej línii a podľa priestorového rozloženia vegetácie. Na druhej hierarchickej úrovni bola plocha aktívneho koryta rozčlenená na vnútrokorytové štruktúry reprezentujúce vodnú plochu a štrkové lavice. Laterálna dynamika bola identifikovaná na základe prekryvu polygónov aktívneho koryta medzi dvoma časovými horizontmi podľa metodiky Lehotského et al. (2013) a Rusnáka a Lehotského (2014a, 2014b), kde sme identifikovali polygóny erózie a akrecie. Plocha akrecie tak predstavuje plochu bývalého

koryta, ktorá sa laterálnym presunom stala súčasťou nivy s vegetačným krytom (les, lúka, pole) a plocha erózie predstavuje časť nivy, ktorá sa stala súčasťou aktívneho koryta.

Skompilovaná databáza reprezentuje základný zdroj informácií, ktoré vstupujú do jednotlivých analýz ako vektorové vrstvy. Jej disagregácia do menších jednotiek (disagregované geomorfologické objekty – DGO) s pravidelnou dĺžkou 100 m prebehla v prostredí ArcGIS na základe stredovej línie (CL) generovanej pre všetky sledované roky. Vodný tok Belá tak bol rozdelený na 227 segmentov dlhých 100 m číslovaných v smere toku a rieka Ondava na 118 segmentov. Základné morfológické parametre koryta, ako je plocha a šírka, boli identifikované z geodatabázy. Priemerná šírka koryta bola identifikovaná ako pomer plochy koryta a dĺžky koryta pre každý individuálny disagregovaný segment. Plocha lavíc bola prepočítaná na DGO (100 m segmenty) a erózo-akrécne procesy sa prepočítali nielen na jednotlivé DGO, ale z dôvodu rôznej dĺžky časového rozpätia období sa vážili aj počtom rokov. Výsledná hodnota erózo-akrécnych procesov vyjadruje intenzitu procesu za rok v danej perióde. Výsledná databáza bola spracovaná v štatistickom softvéri PAST (Hammer et al. 2001). Identifikácia rozdielov sledovaných morfológických parametrov (šírka koryta, plocha lavíc, plocha erózie-akrécie) medzi jednotlivými rokmi bola vyhodnotená pomocou neparametrického Mann-Whitney U testu. Zmeny sledovaných atribútov boli vyhodnotené ako významné pri výslednej hodnote hladiny významnosti $\alpha = 0,05$.

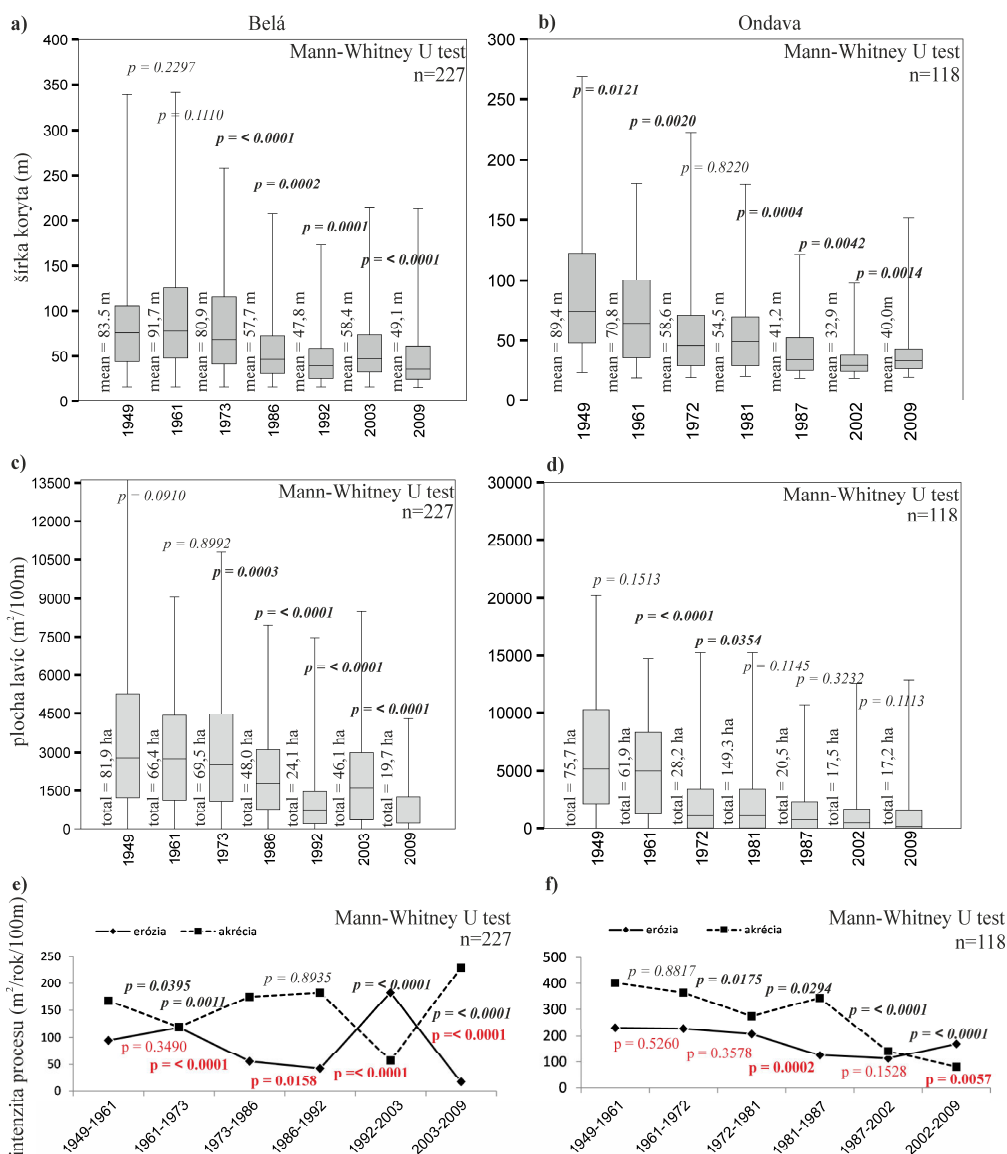
Údaja boli doplnené terénnym prieskum, ktorým sa verifikovala presnosť vektorizácie a dopĺňali údaje o vertikálnych zmenách koryta. Antropogénne vplyvy boli identifikované na základe vodohospodárskych máp 1:50 000, vrstiev úprav tokov poskytnutých Slovenským vodohospodárskym podnikom, ktoré boli doplnené terénnym meraním pomocou GPS Leica Zeno 5 a GPS Leica GS20. Informácie o zmenách krajiny pokrývky sme získali z údajových vrstiev Corine Land Cover poskytnutých SAŽP. Na základe analýzy maximálnych mesačných a ročných prietokov získaných zo Slovenského hydrometeorologického ústavu pre stanice Lip-tovský Hrádok, Podbanské (Belá), Bardejov a Hanušovce nad Topľou (Topľa) bol analyzovaný vplyv povodňových udalostí na morfológiu koryta (analýza POPSEGA, Kidová et al. (2016)) a zmeny v hydrologickom režime vodného toku.

Výsledky

Zmena pôdorysnej vzorky

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že za posledných 60 rokov (1949 – 2009) došlo na Belej k celkovému zúženiu divočiaceho pásu v priemere o 34,4 m (obr. 3a) a koryto si za sledované obdobie zachovalo len 56,2 % svojej pôvodnej šírky. Mann-Whitney U test indikuje významnú zmenu šírky koryta od roku 1973, kedy postupne dochádza k zúženiu koryta z 80,9 m na 49,1 m. K najmarkantnejšiemu zúženiu koryta, o 23,2 m, došlo medzi rokmi 1973 až 1986. Nárast priemernej šírky koryta bol zaznamenaný medzi rokmi 1949 a 1961 (nárast o 8,2 m) a medzi rokmi 1992 a 2003 (10,6 m), ktorý sa prejavil aj štatistickou významnosťou na úrovni $p = 0,0001$. Plocha štrkových lavíc v skúmanom území poklesla z 81,9 ha na 19,7 ha (obr. 3c), pričom k najvýraznejším zmenám dochádza od roku 1973. Do roku 1992 je viditeľný výrazný pokles v ploche štrkových lavíc na hodnotu 24,1 ha, nasledovným výrazným nárastom (46,1 ha) a opätovným poklesom.

Ondava je charakteristická dlhodobým trendom zužovania koryta s poklesom priemernej šírky z 89,4 m v roku 1949 na 32,9 m v roku 2002. V poslednom sledovanom období došlo k nárastu šírky na 40 m (2009) (obr. 3b). Mann-Whitney U test poukazuje na významnú zmenu v šírke koryta porovnávanú medzi dvoma nasledujúcimi rokmi v celom skúmanom období s výnimkou periódy 1972–1981. Plocha aktívneho koryta sa v sledovanom úseku znížila z 116,3 ha (1949) na 46,95 ha (2002) s nárastom v roku 2009 na 54,29 ha. Zmena v plošnej veľkosti koryta je výsledkom výrazného zníženia plochy štrkových lavíc v koryte (obr. 3d). Ich plocha klesla z 75,70 ha na 17,17 ha v roku 2009, pričom štatisticky významný bol predovšetkým pokles v ich rozlohe medzi rokmi 1961 – 1972 a 1972 – 1981.



Obr. 3. Vývoj šírky aktívneho koryta rieky Belá (a) a Ondava (b); vývoj plochy štrkových lavíc na Belej (c) a Ondave (d); a procesov erózie a akrecie na Belej (e) a Ondave (f) medzi rokmi 1949 – 2009. Hodnoty p indikujú signifikantnosť zmeny neparametrickeho štatistického Mann-Whitney U testu medzi dvoma nasledujúcimi obdobiami a štatistický významné zmeny sú zvýraznené tučným písmom (hodnota hladiny významnosti $\alpha = 0,05$)

Laterálna dynamika

Výsledky analýzy intenzity eróznno-akrécnych procesov vždy medzi dvoma rokmi (obr. 3e) poukazujú na fakt, že v celom sledovanom období celkovo prevláda na Belej proces laterálnej akrecie nad procesom bočnej erózie v pomere 1,8:1. Prvé dve obdobia do roku 1973 sa prejavujú nárastom intenzity procesov erózie a poklesu akrecie do vyrovnaného stavu v 1961 – 1973 s hodnotami akrecie 119,5 m²/rok/100m a erózie 118,7 m²/rok/100m. Potom nasleduje perióda do roku 1992, s výraznou prevahou procesov akrecie (3- až 4-násobne) nad procesmi

erózie. Posledné dve periódys sú charakteristické výraznými zmenami so štatistickou významnosťou väčšou ako $p = 0,0001$. Perióda 1992 – 2003 je charakteristická prevahou erózie na úrovni $182,2 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ oproti akrecii na úrovni $57,2 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$. V poslednej sledovanej perióde 2003 – 2009 dochádza k výraznej prevahe akrecie ($229,1 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$) nad eróziou ($16,7 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$).

Na Ondave v celom sledovanom úseku prevláda proces akrecie nad eróziou približne v pomere 1,5:1. Priemerná intenzita akrecie dosahuje úroveň $267,7 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ a erózia $179,3 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$. Obdobie rokov 1949 – 1981 je charakteristické vyrovnanou intenzitou erózných procesov na úrovni $230,9$ až $207,3 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ a postupným poklesom intenzity akrecie zo $402 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ na $274,4 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$. V perióde 1981 – 1987 dochádza k významnému nárastu intenzity akrecie na úroveň $343 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ a poklesu erózie na $125,9 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$. V ďalšom období dochádza k významnému poklesu intenzity procesu akrecie na $141,5 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ a v poslednom období, naopak k zmene prevahy procesov v koryte vodného toku a nárastu intenzity erózie na úroveň $170,3 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$ a ďalšiemu poklesu intenzity akrecie na $81,5 \text{ m}^2/\text{rok}/100\text{m}$.

Diskusia

Zmena morfológie vodných tokov je výsledkom pôsobenia viacerých faktorov dlhodobého charakteru, ako je zmena klímy, zmeny využívania územia, antropogénne zásahy do koryta alebo krátkodobých efektov, ako sú povodne.

Dlhodobá odozva rieky Belá na sériu povodňových udalostí sa prejavila najmä na úrovni vnútrokorytovej organizácie morfológických foriem a šírky aktívneho koryta (divočiaceho pásu). Prítomnosť lavicových foriem v koryte indikuje procesy typické pre vysoko-energetické divočiace rieky, čo potvrdzuje aj najväčší podiel plochy lavíc zaznamenaný na začiatku sledovaného obdobia v 50. až 70. rokoch. Po roku 1974 magnitúda povodní poklesla a ich n-ročnosť už nepresahovala 10-ročný prietok. To dokazuje aj analýza Halmovej a Pekárovej (2011), ktorá poukazuje na pokles trvania veľkých povodní v druhej polovici ich sledovaného obdobia (1969 – 2008), zatiaľ čo trvanie menších povodní malo vzrastajúci trend. Malé 1- až 2-ročné prietoky vyskytujúce sa v tomto období nemali výrazný deštruktívny efekt, podobne ako uvádzajú Corenblit et al. (2007), Opperman et al. (2010) alebo Ward et al. (2002), ale naopak, prispievali k akumulácii jemných sedimentov a stabilizácii systému. Geomorfologický efekt 5- až 7-ročných povodní v poslednom sledovanom období (2002 – 2009) sa prejavil najmä v dominancii procesov akrecie (stabilizácia lavíc a ich transformácia na ostrovy). Pôsobením spätnej vertikálnej erózie sme v blízkosti prevádzky MVE zaznamenali miesta s vystupujúcim flyšovým podložím (obr. 4a), kde zarezanie koryta dosahuje približne 1 m. Protipovodňová úprava koryta v jeho dolnej časti (obr. 4b) s dĺžkou takmer jednej tretiny vodného toku obmedzuje laterálny pohyb koryta a výrazne stabilizuje procesy vnútrokorytovej morfológie. Podobne ako uvádzajú Wyžga (1991, 1993, 1996, 2001a, 2001b), Lach a Wyžga (2002), ako aj Zawiejska a Wyžga (2010), lokálne zarezávanie vodného toku je spôsobené antropogénnym zásahom (súčasná prevádzka MVE), ktoré bolo v jeho dolnej časti podporené ťažbou sedimentov (Surian a Rinaldi 2003) s cieľom zabezpečenia prietocnosti mostných objektov počas veľkých povodní po výstavbe priečných prahov medzi rkm 0 až 4.

Podobné správanie a degrádujúci trend vývoja je charakteristický aj pre rieku Ondava, kde povodňové udalosti v období 1972 – 1981 (maximálny dosiahnutý prietok na úrovni 100-ročného prietoku v roku 1974) viedli k zastaveniu trendu zužovania koryta. Na rozdiel od rieky Belá je Ondava stále ovplyvnená ťažbou sedimentov z koryta vodného toku v objeme 1 tis. m^3 ročne (obr. 4c), čo vedie nielen k morfológickým, ale aj značným ekologickým zmenám a škodám. Podobný výsledok vo svojich prácach uvádzajú aj Rinaldi et al. (2005), Brestolani et al. (2015), Costea (2018), ktorí poukazujú na vplyv ťažby sedimentov na vodné toky v Talian-

sku, Poľsku a Rumunsku. V sledovanom úseku Ondavy dochádza k zarezávaniu koryta vodného toku do podložia, ktoré je tvorené paleogénnymi pieskvcami a ílovcami (obr. 4d), ale pre porovnanie chýbajú staršie dáta o vertikálnej polohe koryta a súčasné merania od roku 2011 nepreukázali výrazné zahĺbovanie sa koryta.



Obr. 4. Zarezávanie koryta Belej do flyšového podložia ako geomorfologický efekt povodne v lete 2010 (a), protipovodňová ochranná hrádza v intraviláne mesta Liptovský Hrádok, Belá (b) ako príklad ireverzibilnej zmeny morfológie koryta; výrazná ťažba štrkov na Ondave ako antropogénny faktor zmien v koryte (c) a zarezávanie koryta Ondavy do podložia tvoreného striedaním pieskvcov a ílovcov s maximálnou hĺbkou 1,9 m (d)

Znižovanie plochy lavíc je podporené aj zmenou laterálnej dynamiky. Výsledky poukazujú, že kľukatiaci sa vodný tok Ondava má v porovnaní s Belou približne dvakrát väčšiu dynamiku laterálneho pohybu, ktorá je vyjadrená erózo-akrécnymi procesmi. Šírka koryta (zužovanie) a veľkosť plochy štrkových lavíc (pokles) je tak závislý od tejto dynamiky, ktorý vedie aj k erózii brehovných stien, posunu koryta a vytváraniu nových štrkových lavíc. Práve remobilizácia sedimentov uložených na nive je dôležitá pre tvorbu morfológie a pôdorysnej vzorky (Liro 2016). Simon et al. (2000) poukazuje na fakt, že až 85 % sedimentov vo vodnom toku pochádza práve z procesu brehovej erózie. Vplyv zarezávania na zužovanie koryta má

výhradne lokálny charakter a prispieva k zvyšovaniu laterálneho obmedzenia vodného toku. Laterálna dynamika toku je ovplyvnená jednotlivými povodňovými udalosťami a suchými obdobiami, ktoré podporujú sukcesiu vegetácie, a tak zvyšujú odolnosť systému voči morfológickým zmenám (Corenblit et al. 2007). Na Belej sa to prejavuje výrazným vplyvom povodňových udalostí na morfológické zmeny. V periódach s výskytom intenzívnejších povodní prevláda proces erózie (1949 – 1961 a 1992 – 1993). Podobné výsledky boli zistené aj na iných vodných tokoch v oblasti Západných Karpát, ako je rieka Morávka v Českej republike (Škarpich et al. 2013), alebo na riekach Raba, Wisłoka, Dunajecv Poľsku (Wyžga 1993, Lach a Wyžga 2002, Zawiejska a Wyžga 2010). Prejav morfológických zmien Ondavy je robustnejší, pričom z priebehu grafu intenzity eróžno-akrécnych procesov v poslednej perióde je viditeľná prevaha erózných procesov (rozšírenie koryta), ktorá je podmienená výrazným poklesom akrécnych procesov.

Ďalšie antropogénne zásahy (úprava koryta, spevňovanie brehov) ovplyvňujúce laterálnu dynamiku, transformáciu riečneho systému, vedú k zníženiu dotácií sedimentov do koryta (Škarpich et al. 2013, 2016). Po ničivých povodniach v rokoch 1934 a 1958 (50-ročný prietok) sa na Belej začala regulácia koryta s cieľom protipovodňovej ochrany, ktorá ireverzibilne ovplyvnila dynamickú štruktúru morfológických foriem koryta v podobe redukcie aktívneho divočenia v intraviláne mesta Liptovský Hrádok (rkm 0 až 5). V súčinnosti s ďalšími technickými zásahmi v koryte (priečne stabilizačné prahy) došlo k stabilizácii vnútrokorytových foriem a úpravami na hornom Váhu aj k zníženiu eróznej bázy. Intenzívna ťažba štrkov sa na Belej skončila v roku 2000 (Kidová et al. 2016) a v súčasnosti sa obmedzuje iba na lokálne úpravy koryta v blízkosti malej vodnej elektrárne. Na Ondave sa úpravy koryta viažu predovšetkým na bagrovanie štrkových lavíc, pričom materiál nechávajú v podobe valov v okolí koryta. Ďalším problémom je aj nekontrolovaná ťažba štrkov, čo vplýva na množstvo sedimentov v koryte.

Vo všeobecnosti možno konštatovať, že na konci 19. storočia a v priebehu 20. storočia dochádza k interakcii viacerých vplyvov človeka v riečnej krajine, pričom je veľmi ťažké odlíšiť ich priamy vplyv (Liébaut a Piégay 2002). Wyžga (2001b) poukazuje na zmenu tendencie riek (región Karpát) z agradácie vplyvom úprav korýt a zmien v povodí (krajinná pokrývka) na začiatku 20. storočia na degradáciu koryta, pričom výrazne zdôrazňuje efekt úprav korýt na zarezávanie vodných tokov. Ako upozorňuje, netreba zabúdať ani na zníženú dotáciu sedimentov vplyvom konca Malej doby ľadovej, zmenu využívania krajiny v povodí a ťažbu štrkov. Tieto závery možno aplikovať aj v našich zemepisných šírkach, kde na Belej došlo k zvýšeniu plochy lesných porastov z 55,4 km² v roku 1957 na 84,9 km² v roku 2008 (Kidová et al. 2016) a na Ondave naopak k opačnému procesu poklesu plochy lesa zo 640 km² v roku 1970 na 449 km² v roku 2016. Proces vývoja koryta vodných tokov nie je stabilný, ale osciluje okolo určitého stavu, ktorý je definovaný a ovplyvnený hraničnými vnútenými a režimovými podmienkami (Brierley a Friys 2005). Znamená to, že Belá a Ondava sú dynamické vodné toky s výraznými zmenami morfológie štruktúry. Dôležité je identifikovať hraničné podmienky, kedy dochádza ku kvalitatívnym zmenám systému, pričom brehová erózia je dôležitým zdrojom prísunu sedimentov do koryta a ovplyvňuje laterálnu dynamiku. Vonkajšie podmienky, ako sú zmeny krajinnéj pokrývky, koniec Malej doby ľadovej a antropogénne zásahy, výrazne ovplyvňujú trend vývoja vodného toku a naopak, povodne predstavujú krátke pulzové udalosti, ktoré ovplyvňujú dynamiku systému, ale nedokážu zvrátiť trend vývoja ovplyvnený vonkajšími podmienkami. Vodné toky sa vyvíjajú podľa vývojovej trajektórie určitého smeru, v rámci ktorej dochádza k osciláciám vývoja rieky zapríčinenými zmenou charakteru a intenzity morfogenetických procesov (Hradecký 2002a, Lehotský 2005). Prispôsobovanie sa vodného toku reflektuje a kumuluje súčasné, ako aj minulé udalosti vrátane akýchkoľvek "off-site" efektov (Brierley a Friys 2005). V prípade skúmaných vodných tokov je trajektória vývoja daná vonkajšími podmienkami a krátkodobé "off-side" efekty predstavujú jednotlivé povodňové udalosti.

Záver

Výskumu vodných tokov na Slovensku za posledných 25 rokov venovalo svoju pozornosť nemálo autorov s využitím rôznych fluvialno-geomorfologických metód. Cieľom príspevku bol výskum viackorytovej pôdorysnej vzorky Belej, ako aj kľukatiaceho riečného systému Ondavy, s poukázaním na celkové trendy vývoja dvoch priestorovo a typologicky odlišných vodných tokov za posledných 60 rokov so zameraním sa na zmeny morfológie koryta, ako ich odozvu na zmenené environmentálne podmienky. Belá predstavuje na Slovensku jedinečný riečny systém so zachovalým divočiaco-migrujúcim viackorytovým pôdorysom (Kidová a Lehotský 2012) a Ondava je charakteristická výraznou laterálnou dynamikou (Rusnák et al. 2016), pričom sú oba vodné toky málo ovplyvnené človekom. Použitie GIS nám umožnilo získať relatívne komplexnú a presnú informáciu o vývoji koryta. Dosiahnuté výsledky poukazujú na fakt, že správanie sa divočiaceho vodného toku Belá reprezentuje situáciu blízko hranice degradujúceho vodného toku viackorytovej pôdorysnej vzorky. Z dlhodobého hľadiska sa očakáva zjednodušenie originálnej viackorytovej vzorky a jej transformácia do migrujúcej a jednoduchšej pôdorysnej vzorky. Naopak štrkonosná kľukatiaca sa rieka Ondava sa nachádza v štádiu, kde väčšie povodne spôsobujú značnú brehovú eróziu a migráciu koryta, ktoré sú dostačujúce pre lokálne a krátkodobé zvrátenie negatívneho trendu vývoja. Antropogénnymi zásahmi (tážba štrkov, opevnenia brehu) sa dá očakávať postupné zrýchlenie procesu vertikálnej erózie a nezvratná degradácia systému, a transformácia na jednoduchý a laterálne stabilný vodný tok tečúci v skalnom podloží. Z nedávnej histórie vieme, že vodné toky na Slovensku prešli za posledných 60 rokov markantnými zmenami týkajúcimi sa najmä vodohospodárskych úprav so zreteľom na protipovodňovú ochranu a energetický potenciál. Avšak i napriek tomu, že mnohé slovenské rieky sú vplyvom regulácie v geomorfologickom zmysle slova „mŕtve“ (nezvratné narušenie laterálnej a vertikálnej kontinuity eróznno-akrécnych procesov) alebo degradujú (zužovanie a zarezávanie koryta), existujú na Slovensku jedinečné riečne systémy, ako napríklad Ondava alebo Belá, ktoré si zachovávajú svoj pôvodný charakter a predstavujú prírodné bohatstvo, ktoré je potrebné nielen skúmať, ale aj chrániť, integrovať a manažovať a v intenciách trvalej udržateľnosti zachovať aj pre ďalšie generácie.

Literatúra

- ALBER, A., PIÉGAY, H. 2011: Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125, 343-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.009>.
- ANSTEAD, L., BARABAS, D. 2009: Biohydromorfologická analýza riečného koridoru - príklad horného Váhu. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 9(2), 64-74.
- ANSTEAD, L., BARABAS, D. 2013: Hydromorfologický prieskum Váhu ako nástroj pre manažment vodných tokov na Slovensku. *Geografický časopis*, 65(1), 61-81.
- BARABAS D. 2008: Analýza priestorového rozloženia akumulačných foriem v korytových úsekoch Bodvy. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 8(1), 7-15.
- BARABAS, D., BÓNA, J., KLEIN, D., BALÁŽOVIČOVÁ, L. 2017: Morphometric and geological conditions for sediment accumulation in the Uda River, Outer Carpathians, Slovakia. *Journal of Geographical Sciences*, 27(8), 981-998. DOI: <https://doi.org/10.1007/11442-017-1416-2>.
- BARABAS D., FRÁNIKOVÁ, J. 2009: Disparita priestorového rozšírenia akumulačných foriem tokov Bodva a Chotárneho potoka. *Geographia Cassoviensis*, 3(2), 17-22.
- BARABAS D., SÝKOROVÁ, J. 2007: Akumulačné formy v koryte toku Bodva a ich priestorové rozšírenie. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7(2), 58-64.
- BAUCH, G. D., HICKIN, E. J. 2011: Rate of floodplain reworking in response to increasing storm-induced floods, Squamish River, south-western British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 872-884. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.2115>.

- BRESTOLANI, F., SOLARI, L., RINALDI, M., LOLLINO, G. 2015: On the morphological impacts of gravel mining: the case of the Orco River. In Lollino, G., Arattano, M., Rinaldi, M., Giustolisi, O., Marechal, J. CH., Grant, E. G. eds. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*, Springer, pp. 319-322. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_66.
- BRIERLEY, G. J., FRYIRS, K. 2005: *Geomorphology and River Management. Applications of River Styles Framework*. Malden (Blackwell Publishing).
- BROOKES, A. 1994: River channel change. In Calow, P., Petts, G. E. eds. *The river handbook; Hydrological and Ecological Principles*. Oxford (Blackwell Science), pp. 55-75. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444313871.ch4>.
- CEBECAUEROVÁ, M., LEHOTSKÝ, M. 2012: Komplexita ripariálnej zóny - príklad rurálneho segmentu vodného toku Torysa. *Geografický časopis*, 64(2), 133-154.
- COSTEA, M. 2018: Impact of floodplain gravel mining on landforms and processes: a study case in Orlat gravel pit (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 77, 119. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7320-y>.
- CORENBLIT, D., TABACCHI, E., STEIGER, J., GURNELL, A. M. 2007: Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84, 56-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>.
- ČENGEROVÁ, K., FALTĀN, V., LEHOTSKÝ, M. 2008: Morfológia riečnych krajinných jednotiek a jej vplyv na ripariálnu vegetáciu na príklade toku Revúcej. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 8(2), 25-37.
- FRANDOFER, M., LEHOTSKÝ, M. 2011: Morfológicko-sedimentová diferenciácia horského vodného toku a jeho odozva na povodňové udalosti. *Geomorphologia Slovaca and Bohemica*, 11(2), 5-86.
- FRANDOFER, M., LEHOTSKÝ, M. 2013: Stupňovitá štruktúra dna koryta vodného toku s výrazným pozdĺžnym sklonom (na príklade horného úseku rieky Topľa). *Geografický časopis*, 65(2), 141-159.
- FRANDOFER, M., LEHOTSKÝ, M. 2014: Morfológicko-sedimentová diferenciácia horského vodného toku a jeho odozva na povodňové udalosti. *Geomorphologia Slovaca and Bohemica*, 14(1), 5-86.
- GALIA, T., ŠKARPICH, V., HRADECKÝ, J. 2012: Dnový transport sedimentů v souvislosti s transformací geomorfologického režimu štěrkonosných toků Moravskoslezských Beskyd. *Geografie*, 117(1), 95-109.
- GREGORY, K. J. 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79, 172-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.018>.
- GREŠKOVÁ, A. 2002: Dynamika a transformácia nivy rieky Moravy študovaná pomocou historických máp a leteckých snímok. *Geomorphologia Slovaca*, 2(2), 40-44.
- GREŠKOVÁ, A. 2004: Priestorová variabilita korytovo-nivného geosystému Vydrice. *Geomorphologia Slovaca*, 4(2), 54-61.
- GREŠKOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M. 2007: Vplyv lesných brehových porastov na správanie a morfológiu riečného koryta. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7(1), 36-42.
- GREŠKOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M. 2009: Fluvial-geomorphological Research in Slovakia: State of the Art and Outlook. *Geographia Slovaca*, 26, 221-235.
- GURNELL, A. M., PETTS, G. E. 2002: Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. *Freshwater Biology*, 47, 581-600. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00923.x>.
- HAJDUKIEWICZ, H., WYŻGA, B., ZAWIEJSKA, J. 2017: Twentieth-century hydro-morphological degradation of Polish Carpathian rivers. *Quaternary International*, in press. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.011>.
- HALMOVÁ, D., PEKÁROVÁ, P. 2011: Statistical evaluation 460 of the extreme flood and drought changes in the Belá River basin. In Gomboň, M., Pavelková, D., Tall, A. eds. *Influence of Anthropogenic Activities on Water Regime of Lowland Territory. Physics of Soil Water*. Bratislava (Institute of Hydrology SAS), pp. 125-133.

- HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., RYAN, P. D. 2001: PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9.
- HRADECKÝ, J. 2002a: Hodnotení časových zmien morfolodiny beskydských toků za využití historických map a leteckých snímků. *Geomorphologia Slovaca*, 2(2), 31-39.
- HRADECKÝ, J. 2002b: Contribution to the morphodynamic chronology of Beskydian rivers (Morávka River 1780 – 1997). In Kirchner, K., Roštínsky, P. eds. *Geomorfologický sborník I*, Brno (PřF MU v Brně), pp. 50-56.
- HRADECKÝ, J. 2007: Štěrkonosný tok Morávka – vývojové trendy korytové morfolodiny a revitalizační opatření. In Hradecký, J., Pánek, T. eds. *Geomorfologický sborník 6*, Ostrava (Ostravská univerzita v Ostravě), pp. 65-67.
- HRADECKÝ, J., ŠKARPICH, V., GALIA, T., DUŠEK, R. 2012: Complex transformation of the channels in the foothills of the Moravskoslezské Beskydy Mts. In Blahůt, J., Klimeš, J., Štěpančíková, P., Hartvich, F. eds. *Geomorfologický sborník 10*, Praha (Ústav štruktúry a mechaniky hornín AV ČR), pp. 11-12.
- KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M. 2012: Časovo-priestorová variabilita morfolodiny divočiaceho a migrujúceho vodného toku Belá. *Geografický časopis*, 64(4), 311-333.
- KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M., RUSNÁK, M. 2016: Spatio-temporal geomorphic diversity in the braided-wandering Belá River, Slovak Carpathians, as a response to modern flood periods and environmental changes. *Geomorphology*, 272, 137-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.002>.
- KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M., RUSNÁK, M. 2017: Recent channel planform evolution of a braided-wandering river using multitemporal data and GIS (Case study of the Belá River, Slovak Carpathians). *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumietus*, 16(1), 247-259. DOI: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.1.247>.
- KOTARBA, A. 1989: On the age of debris flows in the Tatra Mountains. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 23, 139-152.
- LEHOTSKÝ, M. 2005: Metodologické aspekty správania a zmien korytovo-nívných geosystémov. *Geomorphologia Slovaca*, 5(1), 34-50.
- LEHOTSKÝ, M., FRANDOFER, M., NOVOTNÝ, J., RUSNÁK, M., SZMAŇDA, J. B. 2013a: Geomorphic/Sedimentary Responses of Rivers to Floods: Case Studies from Slovakia. In Lóczy, D. ed. *Geomorphological Impacts of Extreme Weather*. Dordrecht (Springer), pp. 37-52. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2_3.
- LEHOTSKÝ, M., GREŠKOVÁ, A. 2007: Odozva morfolodiny vysokogradientového vodného toku na veternú kalamitu - ekologický aspekt. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7(2), 79-84.
- LEHOTSKÝ, M., HORÁČKOVÁ, Š., SLÁDEK, J. 2013b: Morfolodicko-sedimentové zmeny by-passovaného koryta vodného toku - príklad starého koryta Dunaja. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 13(2), 41-49.
- LEHOTSKÝ, M., LACIKA, J. 2007: Typy segmentov dolinovo-riečnych systémov s veľvyščinovou zdrojovou zónou: príklad Tatier. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7(1), 27-35.
- LEHOTSKÝ, M., MATUŠICOVÁ, N. 2014: Človekom indukované morfolodické zmeny riečneho systému - historické pozadie a charakter (príklad dolného toku Váhu). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 14(2), 31-43.
- LEHOTSKÝ, M., NOVOTNÝ, J., SZMAŇDA, J. B. 2010a: Response of the Danube river floodplain to flood events during 2002-2007 period. *Quaestiones Geographicae*, 29(3), 37-45. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10117-010-0021-6>.
- LEHOTSKÝ, M., NOVOTNÝ, J., SZMAŇDA, J. B., GREŠKOVÁ, A. 2010b: A suburban inter-dike river reach of a large river: Modern morphological and sedimentary changes (the Bratislava reach of the Danube River, Slovakia). *Geomorphology*, 117, 298-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.018>.
- LEHOTSKÝ, M., RUSNÁK, M., KIDOVÁ, A. 2017: Application of Remote Sensing and the GIS in Interpretation of River Geomorphic Response to Floods. In Radecki-Pawlik, A., Pagliara, S., Hradecký, J. eds. *Open Channel Hydraulics, River Hydraulics Structures and Fluvial Geomorphology*, Boca Raton (CRC Press, Taylor & Francis Group), pp. 388-399.

- LACH, J., WYŻGA, B. 2002: Channel incision and flow increase of the upper Wisłoka River, southern Poland, subsequent to the reafforestation of its catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 445-462. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.329>.
- LIÉBAULT, F., PIÉGAY, H. 2002: Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.328>.
- LIRO, M. 2016: Development of sediment slug upstream from the Czorstyn Reservoir (southern Poland) and its interaction with river morphology. *Geomorphology*, 253, 225-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.018>.
- MAJERČÁKOVÁ, O., ŠKODA, P., DANÁČOVÁ, Z. 2007: Vývoj vybraných hydrologických a zrážkových charakteristík za obdobia 1961-2000 a 2001-2006 v oblasti Vysokých Tatier. *Meteorologický časopis*, 10(4), 205-210.
- MEDVEĐOVÁ, A., PROKEŠOVÁ, R., KRÁTKA, E. 2007: Morfológia bystrinného toku - príklad potoka Vôdka. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7(2), 25-35.
- NOVOTNÝ, J., CEBEAUEROVÁ, M. 2016: Vybrané aspekty transformácie fluvialného systému rieky Váh v 20. storočí. *Geografický časopis*, 68(1), 73-92.
- NOVOTNÝ, J., LEHOTSKÝ, M., GREŠKOVÁ, A. 2007: Súčasný morfológický vývoj medzihrádzového priestoru (Dunaj, Bratislava). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7(2), 2-78.
- OPPERMAN, J. J., LUSTER, R., MCKENNEY, B. A., ROBERTS, M., MEADOWS, A. W. 2010: Ecologically functional floodplains: connectivity, flow regime, and scale. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), 211-226. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00426.x>.
- PEKÁROVÁ, P., MIKLÁNEK, P., PEKÁR, J. 2003: Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th-20th centuries. *Journal of Hydrology*, 274, 62-79. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00397-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00397-9).
- PEKÁROVÁ, P., MIKLÁNEK, P., PEKÁR, J. 2010: Možnosti dlhodobej predikcie prietokov slovenských tokov na základe indexu Severoatlantickej oscilácie. *Acta Hydrologia Slovaca*, 11(2), 282-290.
- PIŠÚT, P. 1993: Deštrukcia Petržalky v 2. polovici 18. storočia laterálnou eróziou Dunaja. *Geografický časopis*, 45(1), 41-52.
- PIŠÚT, P. 1995: Meandrovanie Dunaja pri Bodíkoch pred zmenou charakteru riečiska v 18. storočí. *Geografický časopis*, 47(4), 285-298.
- PIŠÚT, P. 1997: Zmena bratislavského Dunaja podľa historických máp. In Kováčová, M. ed. *Historické mapy*. Bratislava (Kartografická spoločnosť SR), pp. 103-114.
- PIŠÚT, P. 2002: Channel evolution of the pre-channelized Danube River in Bratislava, Slovakia (1712 – 1886). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 369-390. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.333>.
- PIŠÚT, P. 2005: Príspevok historických máp k rekonštrukcii vývoja koryta Dunaja na uhorsko-rakúskej hranici (16.-19. storočie). In Pravda, J. ed. *Historické mapy*. Bratislava (Kartografická spoločnosť SR), pp. 167-181.
- PIŠÚT, P. 2006: Evolution of meandering Lower Morava river (West Slovakia) during the first half of 20th century. *Geomorphologia slovaca et bohemica*, 6(1), 55-68.
- PIŠÚT, P. 2008: Endangerment of the village Čunovo (Slovakia) by lateral erosion of the Danube River in the 18th Century. *Moravian Geographical Reports*, 16, 33-44.
- PIŠÚT, P. 2011: Dunajská povodeň roku 1787 a Bratislava. *Geografický časopis*, 63(1), 87-109.
- PIŠÚT, P., PROCHÁZKA, J., MATEČNÝ, I., BANDURA, P. 2016: Vývoj koryta Váhu pri Leopoldove v 17. – 20. storočí a odozva rieky na zásahy človeka. Bratislava (Univerzita Komenského v Bratislave), 272 p.
- PIŠÚT, P., TOMČÍKOVÁ, I. 2008: Rekonštrukcia vývoja rieky Smrečianky v jej odozvovej zóne podľa historických máp. *Geographia Cassoviensis*, 2(1), 122-127.
- PROCHÁDZKA J. 2013: Pôdorysná vzorka riečného koryta Váhu, Nitry a Dudváhu s osobitým zreteľom na vplyv faktora tektoniky. *Geomorphologia Slovaca and Bohemica*, 13(2), 19-30.

- PROCHÁDZKA J., PIŠŮT, P. 2015: Regulácie koryta nížinného meandrujúceho vodného toku v období r. 1782 - 1900 (na príklade rieky Váh v úseku Sereď-Komárno). *Geographia Cassoviensis*, 9(1), 44-55.
- RINALDI, M., WYŽGA, B., SURIAN, N. 2005. Sediment mining in alluvial channels: Physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21, 805-828. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.884>.
- RUSNÁK, M. 2010: Zmeny pôdorysnej vzorky a presúvanie koryta laterálne čiastočne uzavretej rieky. *Geographia Cassoviensis*, 4(1), 154-158.
- RUSNÁK, M., LEHOTSKÝ, M. 2014a: Povodne, brehová erózia a laterálne presúvanie koryta štrkonosných kľukatiacich vodných tokov (prípadová štúdia tokov Topľa a Ondava). *Acta Hydrologica Slovaca*, 15(2), 424-433.
- RUSNÁK, M., LEHOTSKÝ, M. 2014b: Time-focused investigation of river channel morphological changes due to extreme floods. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 58(2), 251-266. DOI: <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0124>.
- RUSNÁK, M., LEHOTSKÝ, M., KIDOVÁ, A. 2016: Channel migration inferred from aerial photographs, its timing and environmental consequences as the response to present-day floods (the case study: the meandering Topľa River, Slovak Carpathians). *Moravian Geographical report*, 24(3), 32-43. DOI: <https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0015>.
- SIMON, A., CURINI, A., DARBY, S. E., LANGENDOEN, E. J. 2000: Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35, 193-217. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00036-2).
- SURIAN, N. 1999: Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1135-1151. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199911\)24:12<1135::AID-ESP40>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12<1135::AID-ESP40>3.0.CO;2-F).
- SURIAN, N., RINALDI, M. 2003: Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50, 307-326. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00219-2).
- SURIAN, N., ZILIANI, L., COMITI, F., LENZI, M. A., MAO, L. 2009: Channel adjustments and alteration of sediment fluxes in gravel-bed rivers of north-eastern Italy: potentials and limitations for channel recovery. *River research and applications*, 25, 551-567. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.1231>.
- SZMAŇDA, J. B., LEHOTSKÝ, M., NOVOTNÝ, J. 2008: Sedimentological record of flood events from years 2002 and 2007 in the Danube river overbank deposits in Bratislava. *Moravian Geographical Reports*, 16(4), 2-8.
- ŠIPIKALOVÁ, H. ed. 2006: *Spracovanie hydrologických charakteristík za obdobie 1961 – 2000. Záverečné správy výskumnej úlohy SHMÚ*. Bratislava (Slovenský hydrometeorologický ústav).
- ŠKARPICH, V., HRADECKÝ, J., TÁBOŘÍK, P. 2011: Structure and genesis of the quaternary filling of the Slavič River valley (Moravskoslezské Beskydy Mts., Czech Republic). *Moravian Geographical Reports*, 19(2), 30-38.
- ŠKARPICH, V., GALIA, T., HRADECKÝ, J. 2012: Podmínky transportu a akumulace sedimentů v člověkem ovlivněných korytech beskydských toků: příkladová studie soutoku řeky Morávky a Mohelnice. *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 19(1-2), 53-58. DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2012-1-2-053>.
- ŠKARPICH, V., HRADECKÝ, J., DUŠEK, R. 2013: Complex transformation of the geomorphic regime of channels in the forefield of the Moravskoslezské Beskydy Mts.: Case study of the Morávka River (Czech Republic). *Catena*, 111, 25-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.028>.
- ŠKARPICH, V., KAŠPÁREK, Z., GALIA, T., HRADECKÝ, J. 2016: Antropogenní impakt a jeho odezva v morfologii koryt beskydských štrkonosných toků: příkladová studie řeky Ostravice, Česko. *Geografie*, 121(1), 99-120.
- TOMČÍKOVÁ, I. 2007: Hierarchická klasifikácia riečnej krajiny na príklade rieky Smrečianka. *Geographia Cassoviensis*, 1(1), 193-196.

- TOMČÍKOVÁ, I. 2008: Priestorová variabilita morfológie bystrinného vodného toku. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 8(2), 58-68.
- TOMČÍKOVÁ, I. 2013: Zones and segments used in the hierarchical classification of riverine landscapes. *Moravian Geographical Report*, 21(4), 27-37. DOI: <https://doi.org/10.2478/mgr-2013-0018>.
- TOMČÍKOVÁ, I., LEHOTSKÝ, M. 2009: Percepčia riečnej krajiny (Príklad vodného toku Smrečianka). *Geografický časopis*, 61(4), 269-289.
- URBÁNEK, J., NOVOTNÝ, J. 2012: Dynamika fluvialného systému potoka Vydrice. *Geografický časopis*, 64(3), 267-286.
- WARD, J. V., TOCKNER, K., ARSCOTT, D.B., CLARET, C. 2002: Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology*, 47, 517-539. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00893.x>.
- WYŻGA, B. 1991: Present day downcutting of the Raba River channel and its environmental effects. *Catena*, 18, 551-566. DOI: [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(91\)90038-Y](https://doi.org/10.1016/0341-8162(91)90038-Y).
- WYŻGA, B. 1993: River response to channel regulation: Case study of the Raba River, Carpathians. Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 541-556. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3290180607>.
- WYŻGA, B. 1996: Changes in the magnitude and transformation of flood waves subsequent to channelization of the Raba River, Polish Carpathians. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 749-763. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199608\)21:8<749::AID-ESP675>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199608)21:8<749::AID-ESP675>3.0.CO;2-5).
- WYŻGA, B. 2001a: A geomorphologist's criticism of the engineering approach to channelization of gravel-bed rivers: Case study of the Raba River, Polish Carpathians. *Environmental Management*, 28, 341-358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s0026702454>.
- WYŻGA, B. 2001b: Impact of the channelization-induced incision of the Skawa and Wisłoka Rivers, southern Poland, on the conditions of overbank deposition. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17, 85-100. DOI: [https://doi.org/10.1002/1099-1646\(200101/02\)17:1<85::AID-RRR605>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1099-1646(200101/02)17:1<85::AID-RRR605>3.0.CO;2-U).
- ZAWIEJSKA, J., WYŻGA, B. 2010: Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: Patterns, causes and controls. *Geomorphology*, 117, 234-246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.014>.

Pod'akovanie: Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia a s finančnou podporou Vedeckej grantovej agentúry (VEGA číslo 2/0098/18) Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied. Letecké snímky boli poskytnuté Topografickým ústavom v Banskej Bystrici a firmou EUROSENSE s.r.o. Hydrologické údaje poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav.

Adresy autorov

Mgr. Miloš Rusnák, PhD.
Geografický ústav SAV,
Štefánikova 49, 814 73 Bratislava
Slovensko
geogmilo@savba.sk

Ing. Anna Kidová, PhD.
Geografický ústav SAV,
Štefánikova 49, 814 73 Bratislava
Slovensko
geogkido@savba.sk