

APLIKÁCIA ELEKTRICKEJ REZISTIVITNEJ TOMOGRAFIE (ERT) PRI VÝSKUME DIEN DOLÍN A ZMIEN KORYTOVO-NIVNÝCH SYSTÉMOV (PRÍKLAD VYBRANÝCH TOKOV NA ÚZEMÍ SLOVENSKA)

JÁN SLÁDEK*

Ján Sládek: Application of electric resistivity tomography (ERT) in valley bottom research and changes in river channel-alluvial systems (An example of selected rivers in Slovakia). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 14, 2014, 2, 6 figs., 33 refs.

The aim of this paper is to present a method of electric resistivity tomography (ERT) for research of sedimentary infill of valley bottoms. The two study areas in Slovakia were selected to present this method - Valley of the Vydrica Stream in the Malé Karpaty Mts. and valley of the Ondava River in the Ondavská vrchovina Mts.

Although foreign literature encounters with the application of geophysical methods and research in sedimentary infill of valley bottoms, this trend is not represented in Slovak literature. This research is focused on the initial assessment of the sedimentary environment in the areas of interest, as well as on setting the boundary between Quaternary sediments and pre-quaternary valleys bottom. For this purpose, the dipole-dipole method was used. The analyses of ERT sections in the Vydrica Stream valley pointed to the relatively huge sedimentary infill – more than 20 meters. On the floodplain of the Ondava River the lateral migration of old river channels was identified. This movement reaches several 100 meters of width. Also various infilled channels were confirmed by analysis of historical aerial images.

Keywords: ERT, geophysics, fluvial geomorphology, the Vydrica Stream, the Ondava River

ÚVOD

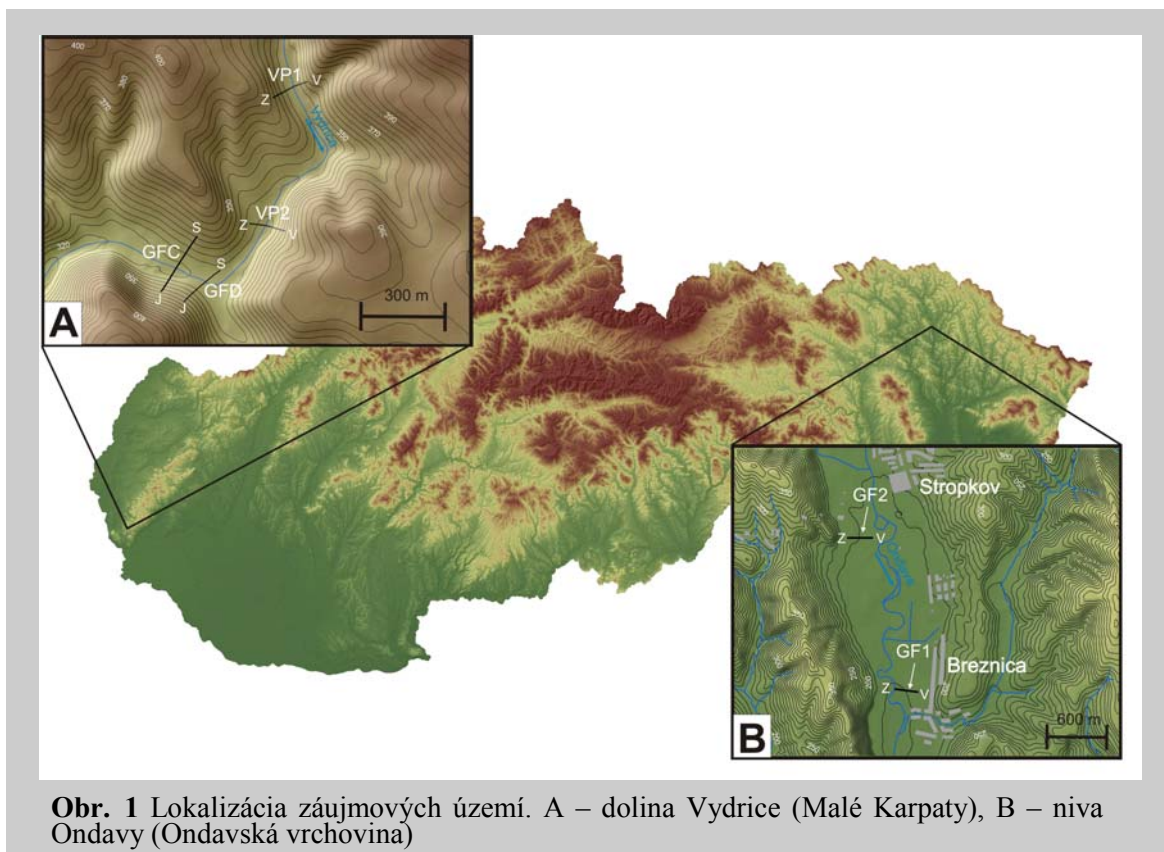
K modernému geomorfologickému výskumu už niekoľko desaťročí patrí interdisciplinárny prístup. Inak tomu nie je ani vo fluvialnej geomorfológii. Populárnymi nástrojmi geomorfologického výskumu ako takého sa za posledné roky stali geofyzikálne techniky (SCHROTT a SASS 2008). Geofyzikálny výskum umožňuje skúmať a získať základné informácie o geologickom podloží operatívne, rýchlo a nedeštruktívnym spôsobom až do hĺbky niekoľko desiatok metrov (DURAS et al. 2005). Z celého radu geofyzikálnych metód sú pre morfodynamicky orientovaný geomorfologický výskum zaujímavé tie, ktoré sa zaoberajú štúdiom pripovrchových vrstiev zemskej kôry, úzko previazaných s reliéfom a podloží. Cez všetky ich výhody sa v priestore českej a slovenskej geomorfológie aj na začiatku 21. storočia, ako podotýkajú DURAS et al. (2005), využívajú iba sporadicky. V poslednom desaťročí sa však v prácach českých geomorfológov stretávame s geofyzikálnymi metódami, ktoré sa stávajú súčasťou širokého spektra geomorfologických štúdií. Medzi často využívané patrí metóda geoelektrického sondovania, ktorá postupne preniká aj do oblasti fluvialnej geomorfológie. Na Slovensku, až na pár výnimiek, geofyzikou podporný geomorfologický vý-

kum prakticky absentuje. Inak tomu nie je ani vo fluvialno-geomorfologických štúdiách. Cieľom príspevku je preto priblížiť využitie jednej z geoelektrických metód – ERT (Elektrická Rezistivná Tomografia, resp. elektrická odporová tomografia) – v kontexte geomorfologického výskumu dnových sedimentov a korytovo-nivných systémov na príklade dvoch vybraných lokalít na Slovensku.

VYUŽITIE GEOELEKTRICKÝCH METÓD PRI ŠTÚDIU DIEN DOLÍN V DOMÁCIH A ZAHRANIČNÝCH PRÁČACH

Na aplikáciu geofyzikálnych metód ako súčasť morfoštruktúrneho výskumu poukazoval vo svojich prácach Kvitkovič (napr. KVITKOVIC a PLANČAR 1975, KVITKOVIC 2002). V súvislosti s monitorovaním svahových deformácií použili ERT PROKEŠOVÁ et al. (2014), ako jednu z metód výskumu zosuvného telesa v Ľubietovej. V domácej (slovenskej) fluvialno-geomorfologickej literatúre sa doposiaľ, napriek početným prácam, ktoré sa zaoberajú štúdiom korytovo-nivných systémov (napr. PIŠŤ 2002, PIŠŤ et al. 2004, NOVOTNÝ et al. 2007, SZMAŇDA et al. 2008, LEHOTSKÝ et al. 2010, MICHALKOVÁ a PIŠŤ 2010,

* Geografický ústav Slovenskej akadémie vied, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, Slovensko, e-mail: geogslad@savba.sk



Obr. 1 Lokalizácia záujmových území. A – dolina Vydrice (Malé Karpaty), B – niva Ondavy (Ondavská vrchovina)

MICHALKOVÁ a MATEČNÝ 2011, KIDOVÁ a LEHOTSKÝ 2012, URBÁNEK a NOVOTNÝ 2012, LEHOTSKÝ et al. 2013, FRANDOFER a LEHOTSKÝ 2014, RUSNÁK a LEHOTSKÝ 2014a, RUSNÁK a LEHOTSKÝ 2014b), geoelektrické metódy prakticky vôbec nevyužívali. Výskumom dnových sedimentov a výplní s využitím geoelektrických metód sa zaoberali najmä práce geológov, resp. geofyzikov. Vertikálnym elektrickým sondovaním sedimentov dnen dolín, resp. sedimentárnych paniev bola na území Slovenska venovaná pozornosť napr. v prácach MALÍK (1983) – sedimentárna výplň Podtatranskej kotliny na nive rieky Belá pri Vavrišove, či PAŠIAKOVÁ et al. (2013) – sedimentárna výplň Dunajskej panvy v okolí Dunajskej Stredy a Veľkého Medera. V týchto a podobných prácach však ide zväčša o analýzu stavby geologického podlažia bez jeho konektivity s reliéfom a procesmi na ňom prebiehajúcimi, či na ich vzájomnej väzby. Jednou z mála prác, kde sú využité geofyzikálne metódy na nivách a terasách vodných tokov, je práca ONDRAŠIK a GAJDOŠ (2011). Autori sa v nej zaoberajú sedimentárnym zložením terasového systému Váhu v Domašinskom meandri za použitia vertikálnej elektrickej sondáže (VES) a metódy elektrickej rezistívnej tomografie (ERT). Identifikujú tu jednotlivé terasy, ich výskyt, zrnitostné zloženie a morfológiu sedimentov v rôznych hĺbkových úrovniach.

Na rozdiel od domáceho prostredia, vo svetovej literatúre sa geofyzikálne metódy aj vo fluviaľnej geomorfológii. Ide o práce, ktoré skúmajú sedimentárne výplne dnen dolín veľkých vodných tokov (napr. FROESE et al. 2005, BOWLING et al. 2007), ale aj menších nív a terás na malých územiach, významných z hľadiska evolúcie študovaného územia (napr. CHAMBERS et al. 2013). Rekonštrukciou fluviaľnej dynamiky sa zaoberajú napr. GOURRY et al. (2003). Využívajú široké spektrum geofyzikálnych metód (elektrické sondovanie, ERT, georadar). Výsledkom je identifikácia sedimentov rôznych zrnitostí v paleokorytách na strednom toku rieky Loire. V kontexte výskumu environmentálnych zmien počas holocénu a laterálnych pohybov koryta na nive Bečvy použili STACKE et al. (2014) okrem analýzy leteckých snímok, topografických máp a plytkých vrtovej aj geofyzikálne metódy (ERT, georadar). Podrobnejšie je použitie geofyzikálnych metód s rôznym nastavením parametrov na nive Bečvy rozpracované v práci STACKE (2013).

ZÁUJMOVÉ LOKALITY

Príklady využitia metódy ERT vo fluviaľno-geomorfologickom výskume prinášame na dvoch výskumných lokalitách na území Slovenska (**Obr. 1**). Lokality predstavujú z geologického aj geomorfologického hľadiska odlišné

prostredia, v ktorých sledujeme interakciu vodného toku s prostredím, ktorým preteká.

Prvá lokalita – dolina vodného toku Vydrice (**Obr. 1A**), predstavuje vodný tok pretekajúci kryštalicím jadrom Malých Karpát. Dominantným horninovým prostredím povodia sú hrubozrnné muskovitické granity, dvojsľudné granity a granodiority – tzv. granity bratislavského typu zo staršieho karbónu. V nich sa nachádzajú vložky metamorfovaných hornín – amfibolitov, biotitických pararúl, aplitov a pegmatitov. Dolina Vydrice rozrezáva južnú časť Malých Karpát generálne v S – J smere na dve časti, pričom smer doliny a jej prítoky sú výrazne ovplyvnené tektonickými líniami prebiehajúcimi v pohorí. Z celkovej dĺžky 18 km je predmetom výskumu dolina Vydrice od jej prameňa po Červený most v dĺžke 14,5 km. Zvyšná časť vodného toku, resp. doliny, je výrazne antropogénne ovplyvnená (výstavba, cestná sieť, zapustenie vodného toku pod povrch a pod.), geomorfologický výskum je tak do veľkej miery znemožnený. Metódou ERT analyzujeme dno a svahy doliny na vybraných profiloch v hornom úseku povodia v dĺžke asi 10 km od prameňa. Výskum a využitie metódy ERT v tejto oblasti sú zamerané predovšetkým na nedeštruktívnu identifikáciu polohy jednotlivých sedimentovaných vrstiev na dne doliny a ich zrnitostnej štruktúry do niekoľko metrovej hĺbky.

Druhou lokalitou, kde sme aplikovali metódu ERT, je niva rieky Ondava pri Stropkove a Breznici. V týchto miestach vytvára rieka vo fľšovom prostredí niekoľko stoviek metrov širokú nivu. Vo vybranom desať kilometrovom dynamickom úseku vodného toku (od mesta Stropkov po ústie do vodnej nádrže Domaša) sa sleduje laterálna migrácia koryta a brehová erózia rieky. Vodný tok v tomto území preteká fľšovým prostredím, zloženým prevažne z eocénnych ílovcov, pieskocov a zlepencov. Niva je z oboch strán ohraničená výraznými svahmi, ktoré sú na mnohých miestach postihnuté zosuvmi. Rieka Ondava v tomto úseku sleduje tektonickú líniu generálne S – J smeru.

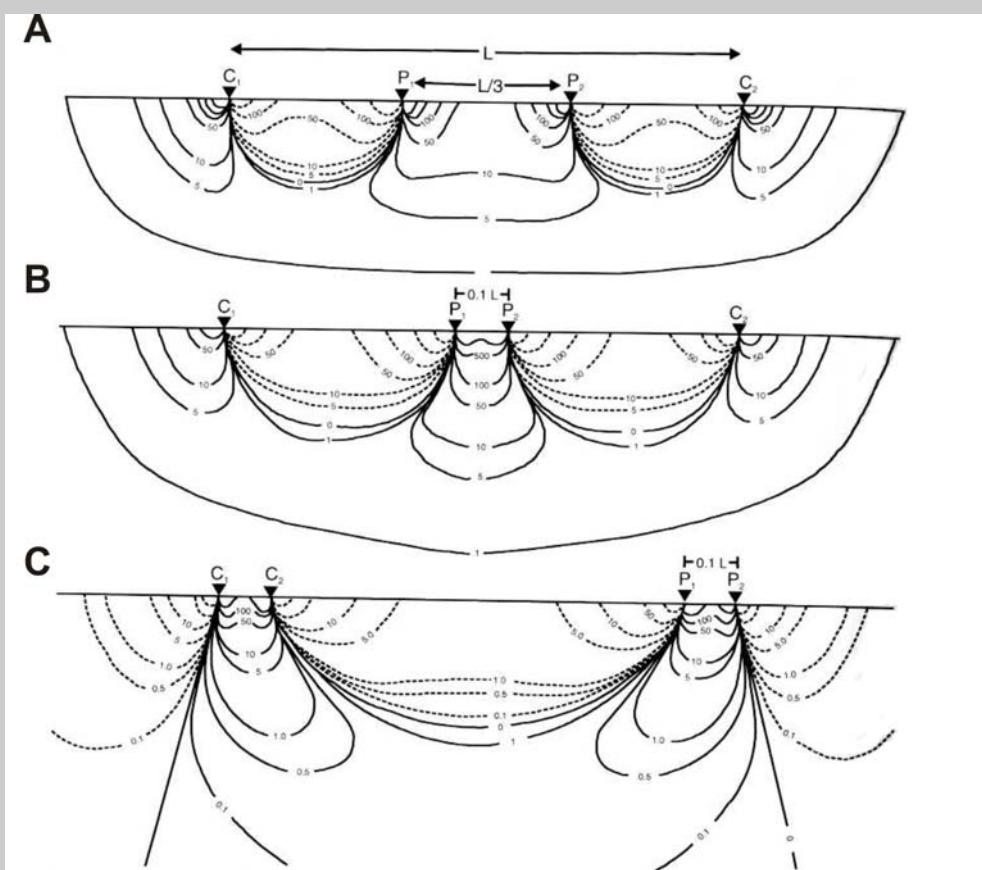
Lokality boli vybrané so zreteľom na prebiehajúce výskumy korytovo-nivných systémov a ich interakciu s okolitým prostredím, ako aj s ohľadom na výrazný vplyv antropogénnej činnosti.

Cieľom výskumu je na základe charakteristiky a vlastností sedimentárnej výplne zistiť, ako sedimentárna výplň na dne doliny reflektovala environmentálne zmeny v povodí, ktoré sa udiali v horizonte posledných niekoľko tisícov rokov, ako aj vplyv antropogénnej činnosti.

METÓDY

Geoelektrika, ako jedna z metód geofyzikálneho výskumu, sa zaoberá skúmaním reakcií horninového prostredia na umelé elektromagnetické polia. To znamená, že sa za pomoci meracích aparátov vytvára elektromagnetické pole (stacionárne elektrické alebo nestacionárne elektromagnetické pole). Výsledkom meraní je v prípade metódy ERT rozčlenenie horninového prostredia podľa jeho merného elektrického odporu. Zo začiatku boli rezistivné metódy používané pre vyhľadávanie vodných zdrojov, dutín pod zemským povrchom, banských šácht atď. Pri výskume georeliéfu nachádzajú geoelektrické metódy pomerne široké uplatnenie od štúdií a monitoringu svahových deformácií, skalných masívov, až po výskum antropogénne podmienených tvarov georeliéfu. Podľa REYNOLDSA (2011) boli elektrické rezistivné metódy vyvinuté už začiatkom 20. storočia, avšak ich širšie uplatnenie nastalo až s nástupom počítačového spracovania údajov v 70. rokoch 20. storočia. Metódy ERT sú základnými metódami pre geofyzikálne zobrazenie vertikálneho rezu horninovým prostredím a predstavujú kombináciu metód odporového profilovania a vertikálneho elektrického sondovania. Vzhľadom na to, že meranie sa realizuje pomocou systému elektród s krokom 2 – 5 m a počítačom riadeným vysielaním prúdu a prijímaním napätia, je možné z výsledku merania získať pomerne detailný obraz o rozložení zdanlivej rezistivity vo vertikálnom reze vedenom pozdĺž meraného profilu. Následné počítačové spracovanie umožňuje namerané dáta transformovať na súbor skutočných hodnôt rezistivity a cez ne získať obraz o reálnej štruktúre vyšetřovaného horninového prostredia.

Pre zistenie úložných pomerov, hrubú orientáciu v zrnitostných pomeroch na dne študovaných dolín a nív a vzájomne porovnateľné výsledky bola pri sondovaní pomocou metódy ERT použitá rovnaká metodika práce. Vo všetkých prípadoch boli merania realizované aparátou ARES (Automatic Resistivity System). Vzhľadom na podmienky na lokalitách a dĺžku profilov bol krok elektród stanovený na 5 m. Usporiadanie elektród je možné aplikovať niekoľkými možnosťami. Najčastejšie používané sú usporiadania typu Wenner, Schlumberger a dipól-dipól. Pre potreby výskumu na nivách bolo aplikované usporiadanie elektród (typ elektródového systému) dipól-dipól (**Obr. 2**). Na rozdiel od usporiadania Wenner alebo Schlumberger, metóda dipól-dipól umožňuje dobrý hĺbkový prienik do horninového prostre-



Obr. 2 Príklady rozmiestnenia a prieniku elektródových systémov do horninového prostredia pri použití ERT. A – Wenner, B – Schlumberger, C – dipól-dipól. Prevzaté z REYNOLDS (2011)

dia, čo je v tomto prípade možné využiť na identifikáciu celkovej mocnosti sedimentárnej výplne a jej odlišenia od pevného podložia vo väčších hĺbkach. Nevýhoda tohto usporiadania je v relatívne slabom vertikálnom rozlíšení (REYNOLDS 2011). V mieste priebehu každého profilu bol zameraný reliéf povrchu s mm výškovou presnosťou pomocou totálnej stanice Leica TCR 307. Tvar povrchu bol zahrnutý do korekcií výpočtov zdanlivých odporov, takže výsledné rezy reprezentujú skutočný tvar reliéfu v danom profile aj s nameranými odpormi pod povrchom.

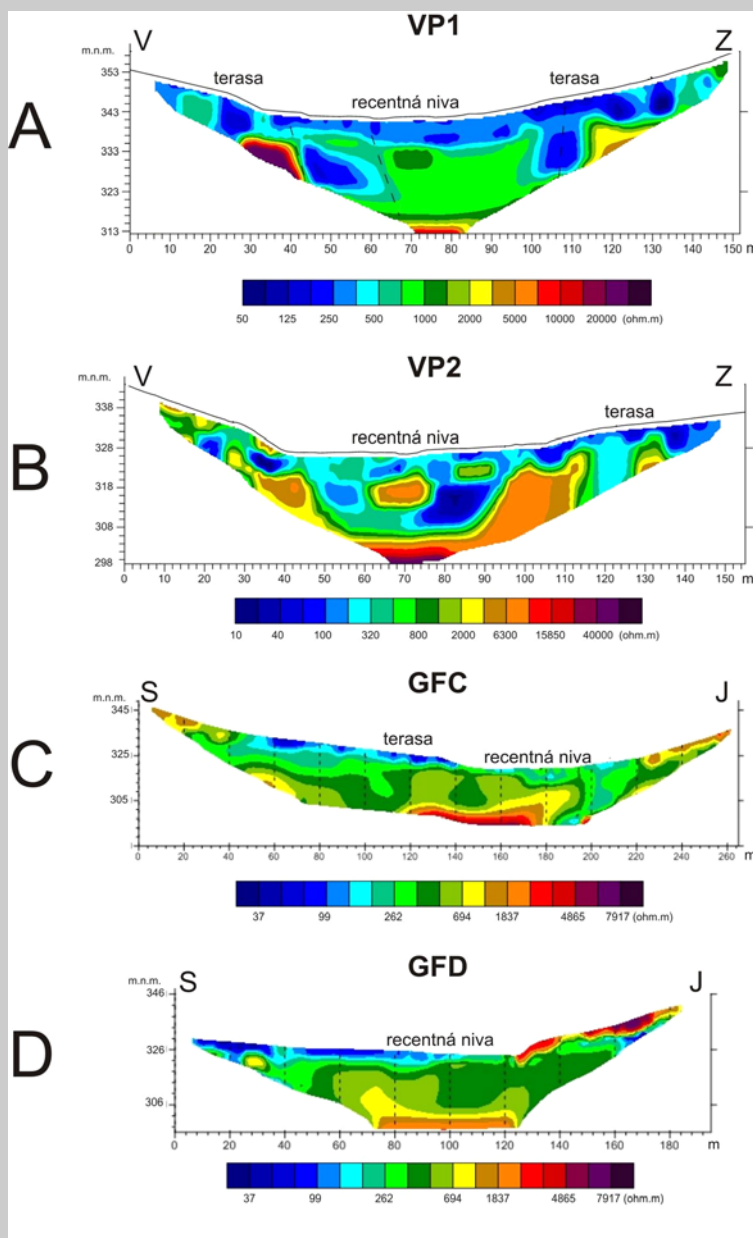
VÝSLEDKY

INTERPRETÁCIA ERT REZOV – DNO DOLINY VYDRICE

Na lokalite v povodí vodného toku Vydrice sme realizovali merania na štyroch profiloch (**Obr. 1A a Obr. 3**). Merané profily mali dĺžku 155 m (VP 1 a VP 2), 265 m (GFC) a 195 m (GFD). Geofyzikálne profily mali poukázať na zrnitosť zloženia terás a nív na dne doliny Vydrice a najst' rozhranie medzi sedimentárny-

mi horninami a pevným podložíom. Z priebehu vertikálnych rezov profilov vyplýva, že svahy a dno doliny sú vzhľadom na parametre dna doliny a charakteristiky vodného toku pokryté pomerne mocnými hrúbkami sedimentov. Ich mocnosť na dne doliny od povrchu po identifikované skalné podložie dosahuje 20 až 25 m, pričom táto oblasť sa nachádza necelé štyri kilometre od prameňa Vydrice. Štruktúra sedimentov na dne doliny na základe analýzy rezov zodpovedá pravdepodobne nivným, resp. korytovým sedimentom so zastúpením štrkových a piesčitých hĺn a štrkov.

Vo vertikálnom rezistivnom reze na **Obr. 3A** je možné identifikovať viacero geologických objektov. Nízke hodnoty elektrickej rezistivity zodpovedajú jemnozrnným zeminám (íly, piesčité íly až ílové piesky). Tieto môžu byť produktom sedimentácie na nive alebo terasách potoka vplyvom fluviaálnych procesov, alebo to môžu byť produkty zvetrávania v tektonicky postihnutých oblastiach. Objekty s vyššou hodnotou elektrickej rezistivity reprezentujú buď hrubozrnné sedimenty v potoku (štrky), slabozvetrané skalné horniny, alebo nezvetrané skalné horniny. Lokálne polohy s nižšou rezistivitou na svahoch môžu byť interpretované

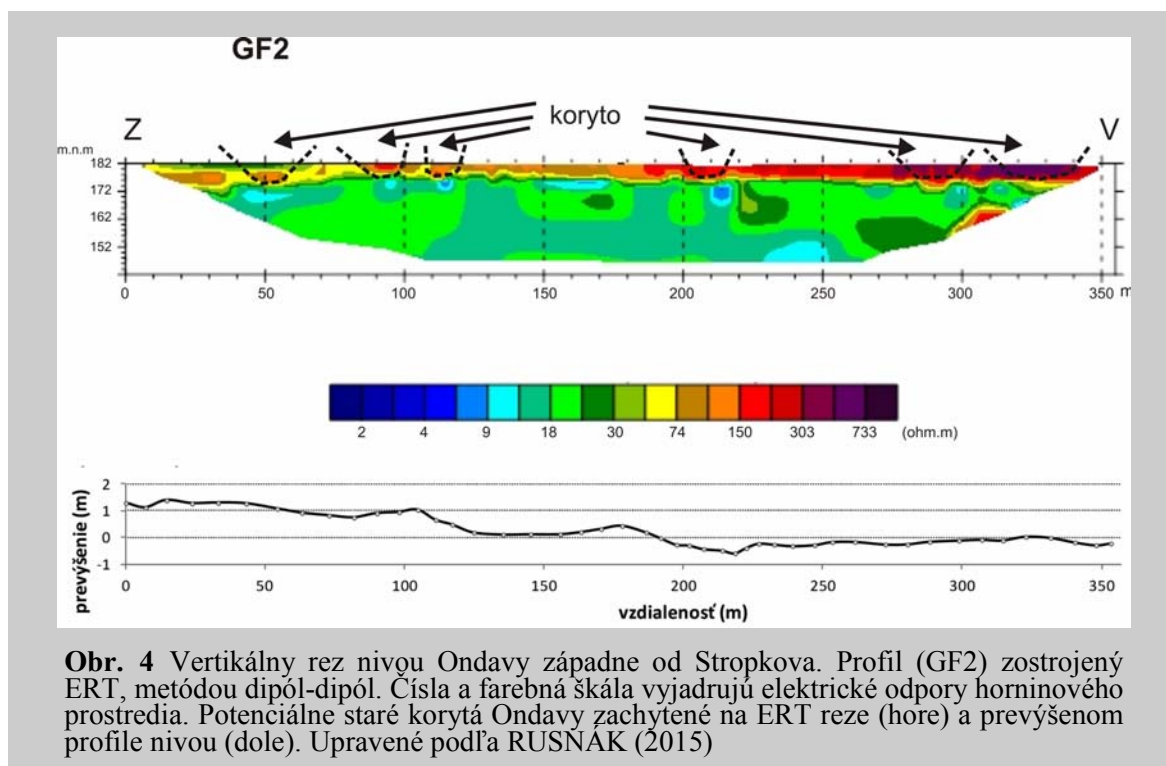


Obr. 3 Rezy horninovým prostredím na dne doliny Vydrice zostrojené metódou ERT

ako terasové sedimenty. Teleso v strede doliny s vyššou rezistivitou by mohlo predstavovať hrubozrnné sedimenty, alebo silno rozrušené skalné podložie, ktoré môže byť výsledkom tektonickej poruchy v ktorej Vydrice vytvára svoju dolinu. Zodpovedali by tomu aj dve takmer kolmé oblasti s oveľa nižšou rezistivitou po stranách doliny.

Mierne odlišná situácia je zobrazená na vertikálnom reze na **Obr. 3B**. Nízke hodnoty rezistivity zodpovedajú jemnozrnným zeminám (íly, piesčité íly až ílové piesky). Opäť sa môže jednať o sedimenty vodného toku na nive, resp. na terasách, alebo by to mohli byť produkty zvetrávania prejavujúce sa na tektonickej poru-

che. Objekty s vyššou hodnotou elektrickej rezistivity reprezentujú buď hrubozrnné sedimenty v potoku (štrky), slabo zvetrané skalné horniny, alebo nezvetrané skalné horniny. V tomto zmysle je najzaujímavejší stred profilu, ktorý vytvára výraznú depresiu a jej výplň vykazuje výrazne nižšie odpory. Pomerne vysoké hodnoty rezistivity po stranách tejto depresie môžu predstavovať skalné podložie. Znamenalo by to, že v tomto mieste sa nachádza približne 25 m mocný pokryv sedimentu. Za predpokladu, že sa jedná o nivné sedimenty, svedčilo by to o relatívne rýchлом prehlbovaní údolia kompenzovanom prínosom sedimentov, pričom vyvstáva otázka, odkiaľ pochádza také



Obr. 4 Vertikálny rez nivou Ondavy západne od Stropkova. Profil (GF2) zostrojený ERT, metódou dipól-dipól. Čísla a farebná škála vyjadrujú elektrické odpory horninového prostredia. Potenciálne staré korytá Ondavy zachytené na ERT reze (hore) a prevýšenom profile nivou (dole). Upravené podľa RUSNAK (2015)

množstvo sedimentu. V samotnej sedimentárnej výplni vidieť prítomnosť telies s vyššou hodnotou rezistivity, čo môžeme interpretovať ako časté meandrovanie potoka, ktorý v závislosti na smere oblúku ukladal buď hrubozrnnejší materiál, alebo jemnozrnnejší materiál (takto je možné v koryte údolia identifikovať minimálne tri hĺbkové úrovne polohy potoka). V skalnom podloží na oboch stranách doliny pozorujeme dve vertikálne telesá s nízkou hodnotou rezistivity. Predpokladáme, že sa jedná o prejav tektoniky so silnou zvetralinovou zónou. Vo svahoch nad nivou je tiež možné identifikovať terasy s jemnozrnými sedimentmi približne v dvoch výškových úrovniach. Na pravej strane doliny (nízke metráže profilu) sú tieto terasové sedimenty v strmom svahu prekryté svahovými sutinami.

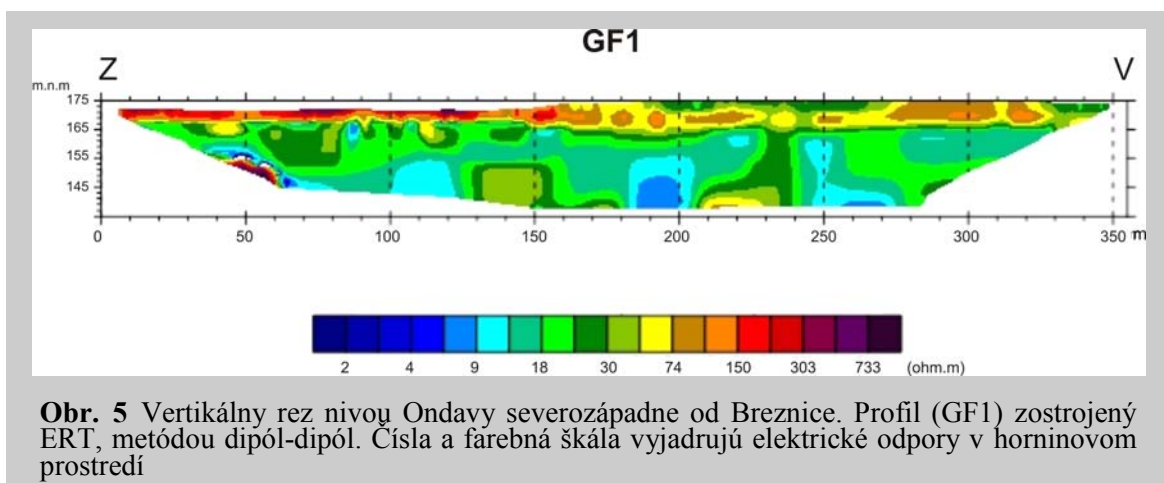
Profil GFC na **Obr. 3C** je na základe interpretácie štruktúrou sedimentu podobný predchádzajúcim rezom. Vo vrchných častiach sa prezentuje prítomnosť kvartérnych sedimentov. V nich na ľavej časti rezu možno identifikovať prítomnosť troch až štyroch terasových akumulácií nívnych sedimentov. Vo svahu nad nimi sa nachádzajú kamenisté delúviá. Na opačnej strane doliny sa terasové sedimenty neprejavujú. Oblasť s vyššími odpormi na povrch predstavuje kamenité deluviálne sedimenty. V podloží, s najvyššími hodnotami rezistivity možno vyčleniť dve pomerne strmé línie s nízkou rezistivitou, ktoré možno interpretovať ako prejav tektonickej línie so zvetralinovou zónou. Profil GFD bol realizovaný na nive potoka v

mieste sútoku dvoch dolín. Podobne ako pri predchádzajúcich profiloch, aj tu môžeme na základe interpretácie rezistivity horninového prostredia identifikovať polohy fluvialných sedimentov vo forme dvoch terás na severnej (S) časti profilu. Na južnej strane rezu sa vo výraznom svahu nachádzajú v dvoch úrovniach oblasti s vysokou hodnotou rezistivity. Spodná oblasť vystupuje na povrch vo forme odkryvu granitoidných hornín. Druhá oblasť s vysokou rezistivitou umiestnenou vyššie vo svahu prekryva polohy jemnejších sedimentov, ktoré výškovo zodpovedajú úrovni predpokladanej druhej terasy na protiláhlom svahu. Ich prekrytie pomerne mocnou vrstvou hornín s vysokým odporom by však mohlo poukazovať na plytkú svahovú poruchu. Na dne doliny, podobne ako v predchádzajúcich rezoch, nachádzame vyše 20 metrov mocnú vrstvu s nižšími hodnotami rezistivity. Opäť by to mohlo poukazovať na fluvialne sedimenty usadené na dne doliny.

INTERPRETÁCIA ERT REZOV – NIVA ONDAVY

V povodí rieky Ondava, v úseku od Stropkova po ústie rieky do vodnej nádrže Domaša, sme metódou ERT realizovali dva rezy. Oba sa nachádzali na nive rieky a nepostihli súčasné koryto.

Prvý rez (**Obr. 4**) s dĺžkou 355 m bol lokalizovaný západne od Stropkova. Lokalita bola zvolená bezprostredne pri koryte, s cieľom identifikovať staré zazemnené korytá na nive.



Obr. 5 Vertikálny rez nivou Ondavy severozápadne od Breznice. Profil (GF1) zostrojený ERT, metódou dipól-dipól. Čísla a farebná škála vyjadrujú elektrické odpory v horninovom prostredí

Vzhľadom na veľkú dynamiku vodného toku (bifurkácia a vznik avulzného koryta) a využitie územia (poľnohospodárska pôda) dochádza v tejto časti skúmaného úseku k výraznej deštrukcii brehu za extrémnych vodných stavov (RUSNÁK a LEHOTSKÝ 2014a, RUSNÁK a LEHOTSKÝ 2014b).

Rez zachytáva uloženie fluviaálnych sedimentov na predkvartérnom podloží. Mocnosť sedimentov sa pohybuje od 3 do 9 metrov. Vo východnom okraji rezu, približne v rozmedzí metráže 270 – 340 m, sú do hĺbky asi 8 metrov výrazne zastúpené štrky na úkor jemnejších a sypekjších fluviaálnych materiálov. V kombinácii s prevýšeným profilom nivy, možno pod týmto hrubozrnným materiálom v predkvartérnom podloží identifikovať denivelácie, ktoré by mohli predstavovať tri staré korytá so šírkou 8 – 20 m (**Obr. 4**).

Profil končí (metráž 350) približne 2,5 m vysokým odkryvom – zárezom avulzného koryta, ktorý pomerne dobre dokumentuje úložné pomery fluviaálnych sedimentov v pripovrchovej vrstve meraného profilu. Smerom na západ, podľa rezu elektrickej rezistivity, klesá frakcia fluviaálnych sedimentov. Na rozhraní kvartérnych a predkvartérnych sedimentov v hĺbke 4 – 8 m tu nachádzame niekoľko vhlbených útvarov, o ktorých možno predpokladať, že sa jedná o staré zazemnené korytá vyplnené jemným štrkovitým, resp. piesčitým materiálom, na ktorom sa nachádza asi 2 m hrubá vrstva hĺn (**Obr. 4**).

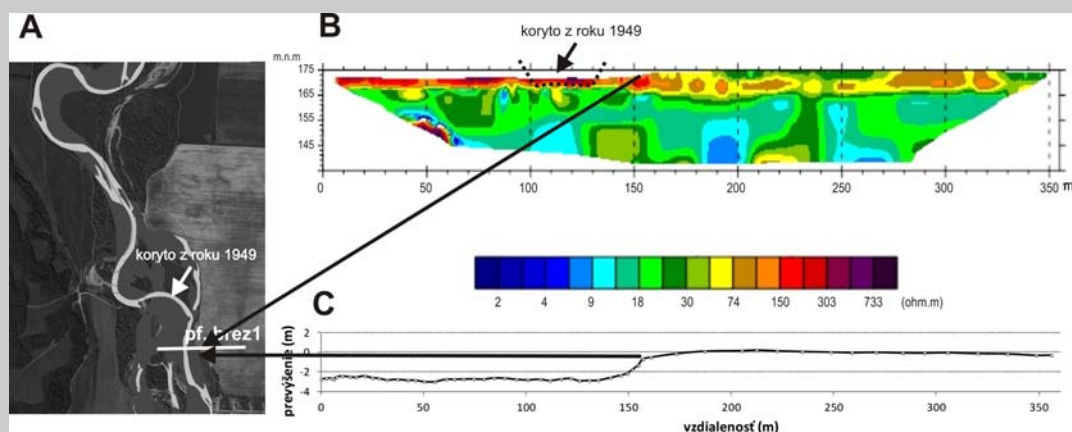
Druhý profil (**Obr. 5**) bol meraný severozápadne od obce Breznica. Morfológicky bol lokalizovaný na dvoch nívnych stupňoch na ľavom brehu Ondavy v celkovej dĺžke 355 m. Podobne ako v prvom prípade, ani tento profil nezasahoval do koryta vodného toku.

Podľa interpretácie vertikálneho rezu, morfológia povrchu nivy reflektuje zrnitosťnú štruktúru kvartérnych sedimentov. Predkvartérne podložie (ilovce, pieskovce, arkózové zle-

pence) sú približne v hĺbke 6 až 12 metrov. V západnej časti rezu do hĺbky asi 6 metrov od povrchu zasahujú pomerne hrubozrnné odolnejšie sedimenty, pravdepodobne štrky, pričom ich zastúpenie v smere na východ postupne ubúda, až približne k 150. metru od začiatku profilu, kde sa v teréne prejavuje približne 1,5 m vysoká hrana. Táto podľa HARČÁRA (1995) predstavuje bližšie nedatované rozhranie vyššej a nižšej nivy. Od hrany na východ sa hrubozrnné štrky vyskytujú iba sporadicky a fluviaálne sedimenty sú zastúpené prevažne striedaním sa piesčitých štrkov s jemnejšími sedimentmi vo forme hĺn, čo by mohlo predstavovať povodňovú fáciu. Hrúbka sedimentov tejto fácie dosahuje okolo 8 – 10 m. Pod touto hranou západným smerom sa podľa interpretácie ERT rezov nachádzajú oblasti s vyššími odpormi, ktoré by mohli predstavovať hrubozrnný materiál korytových facií Ondavy. Takéto koryto je zachytené na najstarších leteckých snímkach (rok 1949) a nachádza sa iba niekoľko desiatok metrov od hrany. V paleogénnom podloží sa prejavujú výrazné vertikálne zóny s nízkou rezistivitou, ktoré môžu byť prejavom tektonickej porušenia paleogénu.

DISKUSIA

Prevedené ERT merania a analýzy vo zvolených územiach (dolina Vydrice a niva Ondavy) poukazujú na viacero zaujímavých skutočností. Výskum v doline Vydrice naznačil pomerne mocnú hrúbku sedimentárnej výplne na dne doliny, ktorá v miestach realizovaných ERT profilov dosahuje vyše 20 metrov. Súčasný vodný tok, resp. morfodynamické procesy na dne doliny, však vôbec nepoukazujú na to, že by bol vodný tok schopný transportovať tak veľké množstvo sedimentu. Možnosť veľkej hrúbky sedimentárnej výplne na dne dolín v Malých Karpatoch načrtol už LUKNIŠ (1955). Pôvod sedimentu uvádza ako výsledok pôsobe-



Obr. 6 Staré koryto Ondavy z roku 1949 pri obci Breznica zachytené na zvektorizovanej leteckej meračskej snímke (A), ERT reze (B) s identifikovanou hranou medzi vyššou a nižšou nivou (B, C). Upravené podľa Rusnák (2015)

nia periglaciálnej klímy v pleistocéne. Vysvetlenie takejto mocnosti by mohlo byť interpretovateľné niekoľkými spôsobmi. Jednou z možností sú sedimenty na dne doliny Vydrice ako produkty transportu zvetralinového plášťa zo zarovnaných vrcholových častí Malých Karpát. Dalšie vysvetlenie by mohlo poukazovať na pôvod sedimentu z povodia Stupavského potoka, v prípade že tu v minulosti došlo k dolinovému pirátstvu, ako na niektorých vodných tokoch v Malých Karpatoch predpokladá LUKNIŠ (1955), resp. URBÁNEK (1992). V tomto prípade, by sa však v doline Vydrice mali nájsť sedimenty zodpovedajúce povodiu Stupavského potoka. Tretiu možnosť pôvodu sedimentu na dne doliny, prípadne jeho vrchnej časti, by mohli predstavovať produkty erodovaného pôdneho krytu, reflektujúc environmentálne zmeny v povodí, ktorý sa usadil na dne doliny počas intenzívneho hospodárskeho využívania Malých Karpát posledných niekoľko stoviek rokov (URBÁNEK a NOVOTNÝ 2012). Obrazy ERT rezov poukazujú s veľkou pravdepodobnosťou na fluviaľný pôvod telies. Tento predpoklad by však bolo potrebné podľa vzoru zahraničných prác dokladovať ďalšími metódami, napr. vrtnými prácami, čo je v daných podmienkach, vzhľadom na značnú mocnosť a heterogenitu sedimentu, obtiažne realizovať.

Dva zrealizované ERT rezy na nive Ondavy pomáhajú dotvárať obraz vývoja nivy a laterálnych presunov koryta v jej historickom vývoji. Pomocou interpretácie rezov bolo možné identifikovať mocnosť fluviaľných sedimentov na dne doliny, ktoré dosahujú miestami 12 metrov. V línii ERT rezov bola možná identifikácia starých zazemnených koryt, ktorá bola potvrdená na historických leteckých snímkach (**Obr. 6**) pri obci Breznica.

Rezy odhalili zazemnené korytá aj v miestach, ktoré sú momentálne využívané ako orná

pôda a ich identifikácia v teréne bez použitia vzorkovacej techniky by bola pomerne obtiažna. Takto bolo možné určiť početnosť a priestorové rozloženie koryt aj tam, kde nemáme pre nedostatok historických leteckých fotografií informáciu o ich výskyte. Západne od Stropkova (profil GF2) nebolo možné vykonať verifikáciu koryt na základe leteckých snímkov, pretože ani najstarší časový údaj (rok 1949) na sledovanom profile korytový systém nezachytáva. Možno tak predpokladať, že korytá zachytené na ERT profile vznikli a boli zazemnené ešte pred rokom 1949. Ich presnejšie datovanie vyžaduje odber vzoriek sedimentu, prípadne organického materiálu. Z ERT rezov badať pomerne veľkú laterálnu dynamiku toku Ondavy v študovanom priestore, kde erózný koridor dosahoval v minulosti niekoľko stoviek metrov. Na základe nových (ešte nepublikovaných) zistení z terénneho výskumu však na niektorých miestach dochádza k výraznej hĺbkovej erózií vodného toku, kde napriek širokej nive je vodný tok zarezaný do paleogénneho podložia miestami 30 až 60 cm. Vzhľadom na charakter podložja (paleogénne pieskovce a ílovce) môže táto skutočnosť viesť k zvýšenej hĺbkovej erózií a dočasnej stabilizácii laterálnych pohybov koryta v týchto úsekoch.

ZÁVER

Prezentovaný príklad využitia vybranej geofyzikálnej metódy ERT na dvoch popisovaných lokalitách poukazuje na široké možnosti aplikácie geofyzikálnych metód aj vo fluviaľno-geomorfologickom výskume. Ako poukazujú práce zahraničných autorov, ale aj výsledky rezov v nami prezentovaných územiach, metóda ERT môže byť vhodná na mapovanie a utvorenie si prvotného obrazu o skúmanom

území nív a terás vodných tokov, ako aj identifikáciu starých zazemnených korýt. Použitím techniky merania dipól-dipól bol dosiahnutý dobrý hĺbkový prienik do podložia, pričom bolo možné identifikovať rozhranie kvartérneho a predkvartérneho podložia. Táto metóda však nie je vhodná na jemnejšie rozlíšenie sedimentov pri povrchu. Pre podrobnejšie rozlíšenie by bolo potrebné zmeniť typ rozmiestnenia elektródového systému (napr. Wenner), ktorý sa používa pri plytkom sondovaní napr. v archeologickom výskume (STACKE 2013, REYNOLDS 2011). Využitím rôznych geoelektrických metód (napr. rozmiestnenie elektród pri ERT, viac napr. STACKE 2013) je možný ne-deštruktívny prienik do horninového prostredia až do hĺbky desiatok metrov, čo urýchľuje a zjednodušuje terénnu prácu bez potreby použitia vrtných súprav, prípadne v miestach, kam vrtné súpravy s plytkým dosahom nemajú prístup.

Ako však poukazujú zahraničné štúdie, pri použití geofyzikálnych metód vo fluvialno-geomorfologickom výskume je vhodné jednotlivé techniky kombinovať, prípadne ich výsledky potvrdiť napríklad vzorkovaním z plytkých či hlbokých vrtov, leteckými alebo ortofoto snímkami, štúdiom horninových odkryvov a pod. V závislosti od zvolenej kombinácie s inými geofyzikálnymi metódami (georadar, vertikálna elektrická sondáž), ale aj vzorkovaním pomocou vrtov, je možné skúmať rôzne štruktúry dnovej sedimentárnej výplne.

Vzhľadom na to, že na oboch prezentovaných lokalitách sa jedná o dlhodobý výskum, v budúcnosti je plánované rozšíriť počet lokalít a ERT rezy doplniť ďalšími podpornými metódami.

POĎAKOVANIE

Príspevok bol vypracovaný s finančnou podporou Vedeckej grantovej agentúry (VEGA číslo 1/0106/12) Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied. Poďakovanie taktiež patrí doc. Vojtechovi Gajdošovi a RNDr. Kamilovi Rozimantovi za pomoc pri realizácii a analýze ERT profilov.

LITERATÚRA

BOWLING, J. C., HARRY, D. L., RODRIGUEZ, A. B., ZHENG, Ch. (2007). Integrated geophysical and geological investigation of a heterogeneous fluvial aquifer in Columbus

Mississippi. *Journal of Applied Geophysics*, 62, 1, 58 – 73.

DURAS, R., HRADECKÝ, J., PÁNEK, T., DUŠEK, R. (2005). Využití geofyzikálních metod při analýze georeliéfu horských oblastí. *Geografický časopis*, 57, 3, 267 – 284.

FRANDOFER, M., LEHOTSKÝ, M. (2014). *Morfologicko-sedimentová diferenciácia horského vodného toku a jeho odozva na povodňové udalosti*. Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 14, 1. Geografický ústav SAV, Bratislava, 87 s.

FROESE, D. G., SMITH, D. G., CLEMENT, D. T. (2005). Characterizing large river history with shallow geophysics: Middle Yukon River, Yukon Territory and Alaska. *Geomorphology*, 67, 3 – 4, 391 – 406.

GAJDOŠ, V., ROZIMANT, K., PUTIŠKA, R. (2000). Geofyzikálny výskum pohybu podzemnej vody v príbrežnej zóne rieky Moravy. *Podzemná voda*, 6, 2, 150 – 155.

GOURRY, J.-C., VERMEERSCH, F., GARCIN, M., GIOT, D. (2003). Contribution of geophysics to the study of alluvial deposits: a case study in the Val d'Avaray area of the River Loire, France. *Journal of Applied Geophysics*, 54, 1 – 2, 35 – 49.

HARČÁR, J. (1995). *Reliéf Nizkých Beskyd. Časť A. Povodie Tople. Časť B. Povodie Ondavy*. Geographia Slovaca, 8. Geografický ústav SAV, Bratislava.

CHAMBERS, J. E., WILKINSON, P. B., PENN, S., MELDRUM, P. I., KURAS, O., LOKE, M. H., GUNN, D. A. (2013). River terrace sand and gravel deposit reserve estimation using three-dimensional electrical resistivity tomography for bedrock surface detection. *Journal of Applied Geophysics*, 93, 25 – 32.

KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M. (2012). Časovo-priestorová variabilita morfológie divočieho a migrujúceho vodného toku Belá. *Geografický časopis*, 64, 4, 311 – 333.

KVITKOVIČ, J., PLANČÁR, J. (1975). Analýza morfoštruktúr z hľadiska súčasných pohybových tendencií vo vzťahu k hlbinej geologickej stavbe Západných Karpát. *Geografický časopis*, 27, 4, 309 – 325.

KVITKOVIČ, J. (2002). Neotektonické pohyby a metódy ich štúdiá. *Geographia Slovaca*, 18 (Bezák, A., ed. Luknišov zborník 3), 103 – 111.

LEHOTSKÝ, M., NOVOTNÝ, J., SZMAŇDA, J. B. (2010). Response of the Danube river

- floodplain to flood events during 2002-2007 period. *Quaestiones Geographicae*, 29, 3, 37 – 45.
- LEHOTSKÝ, M., FRANDOFER, M., NOVOTNÝ, J., RUSNÁK, M., SZMAŇDA, J. B. (2013). Geomorphic/Sedimentary Responses of Rivers to Floods: Case Studies from Slovakia. In Loczy, D., eds. *Geomorphological Impacts of Extreme Weather*. Springer, Dordrecht, 37 – 52.
- LUKNIŠ, M. (1955). Správa o geomorfologickom a kvartérne-geologickom výskume Malých Karpát (dolina Vydrice). *Geografický časopis*, 7, 1, 65 – 80.
- MALÍK, P. (1983). *Korelácia hydrogeologických a geofyzikálnych parametrov zvodneného prostredia*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovakia.
- MICHALKOVÁ, M., PIŠÚT, P. (2010). Fluvial system of the Váh River (Slovakia) on earlier historical maps. In Křížek, M., Nyplová, P., Vočadlová, K., Borská, J., eds. *Geomorfologický sborník 9. 11. mezinárodní konference Stav geomorfologických výzkumů v roce 2010 (Branná, Česká republika, 11. - 13. mája 2010)*. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 86 – 87.
- MICHALKOVÁ, M., MATEČNÝ, I. (2011). Návrh morfolologickej klasifikácie ramennej sústavy Dunaja. *Riční krajina 7. Šborník příspěvků z konference (Olomouc, Česká republika, 5. - 7. oktobra 2011)*. Koalice pro řeky – Česká společnost pro krajinou ekologii - regionální organizace CZ-IALE – Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 119 – 124.
- NOVOTNÝ, J., LEHOTSKÝ, M., GREŠKOVÁ, A. (2007). Súčasný morfológický vývoj medzihrádzového priestoru (Dunaj, Bratislava). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7, 2, 72 – 78.
- ONDRÁŠIK, R., GAJDOŠ, V. (2011). Riečne terasy Váhu v meandri Domašín v Strečnianskej úžine. *Geografický časopis*, 63, 3, 275 – 285.
- PAŠIAKOVÁ, M., GAJDOŠ, V., BUČOVÁ, J., BRIKOV, B., BIELIK, M. (2013). Geofyzikálny obraz stavby sedimentárnej výplne Dunajskej panvy pozdĺž profilu medzi Dunajskou Stredou a Veľkým Mederom: reinterpretácia geoelektrických údajov vertikálneho elektrického sondovania. *Acta Geologica Slovaca*, 5, 1, 45 – 54.
- PROKEŠOVÁ, R., KARDOŠ, M., TÁBOŘÍK, P., MEDVEDOVÁ, A., STACKE, V., CHUDÝ, F. (2014). Kinematic behaviour of a large earthflow defined by surface displacement monitoring, DEM differencing, and ERT imaging. *Geomorphology*, 224, 86 – 101.
- PIŠÚT, P. (2002). Channel evolution of the pre-channelized Danube River in Bratislava, Slovakia (1712 – 1886). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 4, 369 – 390.
- PIŠÚT, P., KUBALOVÁ, S., HAJNALOVÁ, M., SLAMKOVÁ, M. (2004). Study of the Danube River Palaeochannel, Slovakia (preliminary results). *Geomorphologia Slovaca*, 4, 1, 12 – 21.
- REYNOLDS, J., M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester.
- RUSNÁK, M. (2015). *Morfologicko-sedimentologická odozva riečnych koryt na environmentálne zmeny*. Dizertačná práca, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovakia, 130 s.
- 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.
- SCHROTT, L., SASS, O. (2008). Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology*, 93, 1 – 2, 55 – 73.
- STACKE, V. (2013). *Holocénní vývoj údolních niv v předpolí Západních Beskyd (na příkladu řeky Bečvy)*. Dizertačná práca, Prírodovedecká fakulta, Ostravská univerzita, Ostrava, Czech Republic.
- STACKE, V., PÁNEK, T., SEDLÁČEK, J. (2014). Late Holocene evolution of the Bečva River floodplain (Outer Western Carpathians, Czech Republic). *Geomorphology*, 206, 440 – 451.
- 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

(Slovakia). *Moravian Geographical Reports*, 16, 4, 25 – 32.

URBÁNEK (1992). Vývoj dolín v južnej časti Malých Karpát. *Geografický časopis*, 44, 2, 162 – 173.

URBÁNEK, J., NOVOTNÝ, J. (2012). Dynamika fluvialného systému potoka Vydrice. *Geografický časopis*, 64, 3, 267 – 286.