

REGIONÁLNA VARIABILITA POVODŇOVEJ HROZBY MALÝCH POVODÍ NA SLOVENSKU

Lubomír Solín*

* Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, solin@savba.sk

Regional variability of flood threat in small basins of Slovakia.

The paper is involved with identification of regional variability of the flood threat in Slovakia determined by physical attributes and character of land cover in the basin. The small basin is the basic spatial unit for the spatial analysis of flood threat. Graphical analysis of the dependence between the base flow index values or flood event frequency on the one side and the physical attributes of basins on the other pointed to the significant effects of soil texture permeability and forestation of the particular basin on spatial variability of the basic features characterizing the runoff process and frequency of flood events. Based on combination of two soil texture permeability classes and two forestation classes, four classes of flood threat were identified. Their verification by means of flood event frequency values by variance analysis showed that the optimal solution is to delimit three regional types of flood threat in small basins.

Key words: small basins, flood threat, flood situation, regional type, Slovakia

ÚVOD

Tradičný inžiniersky prístup k ochrane pred povodňami, ktorý je založený na výstavbe vodných nádrží, ochranných hrádzí, poldrov a na úprave korýt, je stále významným prvkom ochrany pred povodňami (COM 2004, WMO a GWP 2004). Sprievodným javom jeho aplikácie sú však aj negatívne stránky, medzi ktoré patrí predovšetkým riešenie protipovodňovej ochrany na lokálnej báze, ako aj vyvolávanie klamlivej predstavy o absolútnej ochrane pred povodňami, ktorá zintenzívňuje využívanie územia za ochrannými hrádzami, resp. priechodných zón. Významným negatívnym javom je tiež devastácia prírodného prostredia. Výstavbou hrádží sa preruší prirodzená väzba medzi vodným tokom a jeho priečnou zónou a dochádza k narušeniu alebo zničeniu ekosystémov (napr. lužných lesov), ktorých fungovanie je podmienené pravidelnými záplavami.

Kritické stanoviská k uplatňovaniu výlučne inžinierskeho a fragmentárneho prístupu k preventívnej protipovodňovej ochrane viedli v posledných niekoľkých rokoch k sfornovaniu nového postoja k ochrane pred povodňami, ktorý je označovaný ako neštruktúrný (de Loe 2000), integrovaný (WMO a GWP 2004, COM 2004), holistický (Fleming 2002, Messner a Meyer 2005), udržateľný (Werrity 2006) alebo ako prístup založený na paradigme zraniteľnosti (Morrow 1999, Bankoff 2001, Brown a Damery 2002, Tapsell et al. 2002, Green 2004, Penning-Rowsell et al. 2005, Wagner 2007, Siegrist a Gutscher 2008, Simpson a Human 2008). Podľa Plata (2002) zmena protipovodňovej paradigmy súvisí predovšetkým so zmenou hodnotového systému spoločnosti, v rámci ktorého ochrana prírodného prostredia a ochrana pred povodňami majú približne rovnaký význam a optimálny protipovodňový

systém je kompromisom medzi týmito dvoma cieľmi. Nový prístup k preventívnej protipovodňovej ochrane sa vyznačuje tým, že (COM 2004):

- k protipovodňovej ochrane sa pristupuje na báze celého povodia,
- protipovodňová ochrana je založená na manažmente povodňového rizika,
- v procese stanovovania povodňového rizika sa väčší dôraz kladie na hodnotenie zraniteľnosti obyvateľstva voči povodni a na zohľadnenie nemajetkových škôd a útrap, ktoré im povodeň spôsobí,
- výber optimálnej protipovodňovej stratégie a protipovodňových opatrení sa uskutočňuje transparentným spôsobom a do rozhodovacieho procesu sú zapojené štátne aj lokálne samosprávne orgány, inštitúcie a organizácie podieľajúce sa na hospodárení v povodí, ako aj obyvatelia, ktorí sú ohrozovaní povodňami.

Manažment povodňového rizika patrí medzi kľúčové atribúty nového prístupu. Povodňové riziko je definované ako produkt pravdepodobnosti výskytu špecifikovanej hodnoty maximálneho ročného prietoku a zraniteľnosti objektov voči povodni lokalizovaných v zaplavenej zóne (UN 1992, Smith 1996, DEFRA 2000 a Sayers et al. 2003). Analýza povodňového rizika si vyžaduje informácie o atribútoch sociálneho, ekonomického a environmentálneho systému, ktoré sú citlivé na poškodenie záplavou. Na ich základe je potom v relatívnej alebo absolútnej podobe vyjadrená výška potenciálnych negatívnych dôsledkov spôsobených povodňou (cf. Messner a Mayer 2005, Mayer a Messner 2005 a Meyer et al. 2007). Vyhodnotenie zmien povodňového rizika v dôsledku aplikácie rôznych protipovodňových koncepcií je základom pre výber optimálneho manažmentu povodňového rizika spomedzi viacerých alternatív (Plate 2002). Mapy povodňového ohrozenia a mapy povodňového rizika sú podľa smernice ES (Smernica ES/60/2007) súčasťou plánov manažmentu povodňového rizika povodí. Tradičný prístup protipovodňovej ochrany založený na uplatňovaní bezpečnostných štandardov (t. j. stanovenie napr. výšky hrádží, objemu vodných nádrží, plochy priečného profilu koryta vzhľadom na hodnoty N – ročných maximálnych prietokov) sa analýzou a manažmentom povodňového rizika nezaoberá.

V tejto súvislosti však vzniká otázka, či mapy súčasného stavu povodňového rizika sú postačujúcim informačným zdrojom pre jeho manažment. Samotný výber jednej alebo kombinácie viacerých protipovodňových stratégií a konkrétnych opatrení zmierňujúcich povodňové riziko je podľa WMO a GWP (2004) určovaný predovšetkým klímou, fyzicko-geografickými charakteristikami povodia a sociálno-ekonomickými podmienkami regiónu. Mapy povodňového rizika zohľadňujú hlavne sociálno-ekonomické podmienky lokalít v zaplavených zónach a fyzicko-geografické atribúty povodí, ovplyvňujúce spôsob transformácie zrážok do odtoku, zostávajú nepovšimnuté. Fyzicko-geografické atribúty povodia ovplyvňujú tri dôležité hydrologické premenné: priestory na zadržiavanie vody, infiltrácia a pohyblivosť vody (Smith a Ward 1998). Tie sa potom premietajú aj do vlastností povodia, ktorá sa označuje ako dispozícia povodia pre povodne (Weingartner et al. 2003) alebo ako *geoekologický povodňový potenciál* (Minár et al. 2005) resp. *povodňová hrozba* (Solín 2008).

Rozdielna náchylnosť povodí na vznik povodňových situácií je významným faktorom, ktorý je potrebné zohľadniť pri manažmente povodňového rizika. Výber vhodných stratégií a opatrení preventívnej protipovodňovej ochrany, ako aj ich účinnosť, je nevyhnutné posudzovať s ohľadom na úroveň povodňovej hrozby povodia. Identifikovanie priestorovej, resp. regionálnej variability povodňovej hrozby sa preto stáva veľmi aktuálnym problémom. Ucelený spôsob identifikovania priestorovej variability povodňového potenciálu, resp. povodňovej hrozby Slovenska, podmienenej fyzicko-geografickými komponentmi krajiny, je prezentovaný v prácach Minár et al. (2005) a Solín (2008). V prvej z citovaných prác je územie Slovenska rozčlenené do piatich tried geoekologického povodňového potenciálu. V druhej citovanej práci sú malé povodia Slovenska klasifikované do štyroch tried povodňovej hrozby. Čiastkovým spôsobom sa tejto problematike venujú aj práce Greškovej (2001 a 2002).

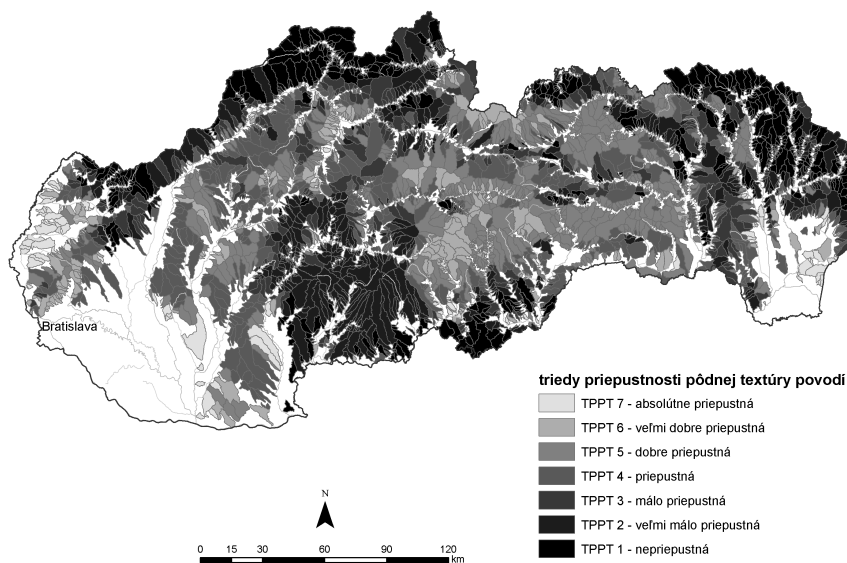
Cieľom predloženého príspevku je spresniť rozčlenenie základného súboru malých povodí Slovenska do štyroch fyzicko-geografických regionálnych tried povodňovej hrozby, ktoré je prezentované v práci Solín (2008). Fyzicko-geografické regionálne typy boli vyčlenené v súvislosti s objasňovaním priestorovej variability povodňových situácií, ktoré sa vyskytli v období 1996-2006 v obciach lokalizovaných v malých povodiach. Pôvodne sa identifikovalo sedem tried povodňovej hrozby. Medzi niektorými triedami však boli malé rozdiely, pokiaľ ide o počet obcí postihnutých povodňou, a tak sa pristúpilo k ich zlúčeniu. Po tejto úprave sa počet tried povodňovej hrozby znížil na štyri. V príspevku prezentované spresnené vyčlenenie regionálnych typov povodňovej hrozby spočíva v modifikácii fyzicko-geografických tried atribútov malých povodí a v testovaní rozdielov vo frekvencii povodňových situácií medzi fyzicko-geografickými triedami povodňovej hrozby metódami indukčnej štatistiky.

ZÁKLADNÝ SÚBOR MALÝCH POVODÍ SLOVENSKA A ICH ATRIBÚTY

Digitálnu vrstvu malých povodí, plniacich funkciu základných priestorových jednotiek, pre potreby regionálnej taxonómie vytvorili Solín a Grešková (1999), a to úpravou rozvodníc, ktoré zdigitalizovala Slovenská agentúra životného prostredia (SAŽP) v rokoch 1997-1998 z vodohospodárskych máp mierky 1:50 000. Digitálna vrstva obsahuje 4 587 autochtónnych malých povodí, ktorých plocha sa pohybuje v intervale od 0,04-150 km². Pre účely tejto štúdie sa vytvoril základný súbor malých povodí, ktorý obsahuje 1 678 povodí rozprestierajúcich sa v horských a pahorkatinných oblastiach Slovenska s plochou povodia v intervale 5-150 km². Pri stanovení dolnej hranice veľkosti malého povodia sa uplatnil predpoklad, že hydrologicky významnou je až odozva z povodia, ktorého rozloha zaberá viac ako 5 km² (HMÚ 1965). Horná hranica veľkosti malého povodia odráža reliéfovú členitosť územia Slovenska.

Fyzicko-geografické vlastnosti malých povodí charakterizuje rozsiahly súbor atribútov reprezentujúcich reliéfové, substrátové, pôdne a zrážkové pomery a charakter krajiny pokrývky (Solín et al. 2000). Databáza fyzicko-geografických atribútov sa vytvorila prekrytím digitálneho modelu reliéfu

(Hofierka et al. 1998), digitálnej vrstvy pôd Slovenska (Šály a Šurina 2000), digitálnej vrstvy krajinej pokrývky vytvorenej metódou CORINE Land Cover (Feranec et al. 1996), tematických mapových vrstiev hydrogeológie (Porubský 1980) a priemerného ročného úhrnu zrážok (Faško 1999) vrstvou malých povodí. Z fyzicko-geografických vlastností povodí sú pôdno-substrátové vlastnosti vyjadrené indexom priepustnosti pôdnej textúry (*IP*T) a indexom priepustnosti pôdnej štruktúry (*IP*S). Indexy *IP*T a *IP*S boli stanovené na základe percentuálneho podielu tried pôdnej textúry, resp. pôdných typov v povodí (cf. Solín 2003). Hodnoty indexov sa zoskupili do tried. V prípade *IP*T je vyčlenených sedem tried priepustnosti pôdnej textúry (obr. 1). Rovnaký počet tried sa vytvoril aj v súvislosti s *IP*S. Z nich boli v tejto štúdií použité tri triedy priepustnosti pôdnej štruktúry.



Obr. 1. Triedy priepustnosti pôdnej textúry malých povodí

Reliéfové pomery charakterizuje priemerná nadmorská výška (*PNVP*) a priemerný sklon (*PSP*), ktorý je vyjadrený v stupňoch. Charakter krajinej pokrývky povodia vyjadruje percento zalesnenia (*L*). Lesnatosť je z hľadiska rozlohy najvýznamnejšou kategóriou krajinej pokrývky. Zahŕňa dve triedy druhej hierarchickej úrovne legendy vytvorenej metodológiou CORINE Land Cover, a to triedu 3.1. – lesy a 3.2 – kroviny alebo trávnaté areály. Hodnoty priemernej nadmorskej výšky, priemerného sklonu a lesnatosti boli zoskupené do nasledovných štyroch tried:

- triedy priemernej nadmorskej výšky: A – 101-385 m n. m., B – 385-652 m n. m., C – 652-976 m n. m., D – 976-1816 m n. m.,
- triedy priemerného sklonu: A – 0-6°, B – 6-12°, C – 12-18°, D – 18-33°,
- triedy lesnatosti: A – 0-24 %, B – 24-51 %, C – 51-76 %, D – 76-100 %.

Intervaly jednotlivých tried vymedzujú zlomové body zodpovedajúce štyrom triedam, ktoré boli identifikované pri klasifikácii povodí do tried na základe uvedených atribútov v prostredí GIS.

Hydrologické atribúty reprezentuje početnosť povodňových situácií v povodiach. Za povodňovú situáciu je podľa právnych noriem SR (Z.z.č. 666/2004) považovaný stav v rieke, ktorý si vyžiadal vyhlásenie tretieho stupňa povodňovej aktivity, t. j. stavu ohrozenia. Stav ohrozenia sa vyhlasuje pri:

- prechodnom výraznom zvýšení hladiny vodného toku, pri ktorom bezprostredne hrozí vyliatie vody z koryta vodného toku alebo sa voda z koryta vodného toku už vylieva,
- dočasnom zamedzení prirodzeného odtoku vody zo zrážok do recipienta, pri ktorom dochádza k zaplaveniu územia vnútornými vodami,
- odchode ľadov, vzniku ľadových zátarás, ľadovej zápchy a iných prekážok v koryte vodného toku, pri ktorom hrozí vyliatie vody z koryta vodného toku, alebo sa voda z koryta vodného toku už vylieva,
- extrémnej zrážkovej činnosti spôsobujúcej zaplavenie územia,
- poruche či havárii vodnej stavby, pri ktorej hrozí vyliatie vody z koryta vodného toku, alebo sa voda z koryta vodného toku už vylieva.

Podkladom pre určenie frekvencie povodňových situácií v povodiach bola databáza ich výskytu v obciach Slovenska v období 1996-2006. Databáza sa vytvorila v prostredí GIS na základe informácií, ktoré sa získali: a) zo správ o povodniach vydávaných SHMÚ, b) zo správ tlačových agentúr TASR a SITA, c) zo správ o priebehu a následkoch povodní spracovaných MP SR a MŽP SR, d) z materiálov o povodniach publikovaných mimovládnyimi organizáciami, spoločenskými združeniami a regionálnou tlačou. Prekrytím digitálnej vrstvy obcí SR a vrstvy malých povodí sa určil počet obcí lokalizovaných v povodí. Ak sa v povodí vyskytuje len jedna obec, tak sa početnosť povodňových situácií povodia rovná početnosti povodňových situácií obce. Ak je v povodí viacero obcí a majú rovnakú početnosť povodňových situácií, potom táto početnosť reprezentuje aj povodie. V prípade, že je početnosť povodňových situácií obcí rozdielna, reprezentuje početnosť povodňových situácií povodia najväčšia vyskytujúca sa početnosť. Je dôležité uviesť, že takmer v každom povodí základného súboru sa nejaká obec vyskytuje.

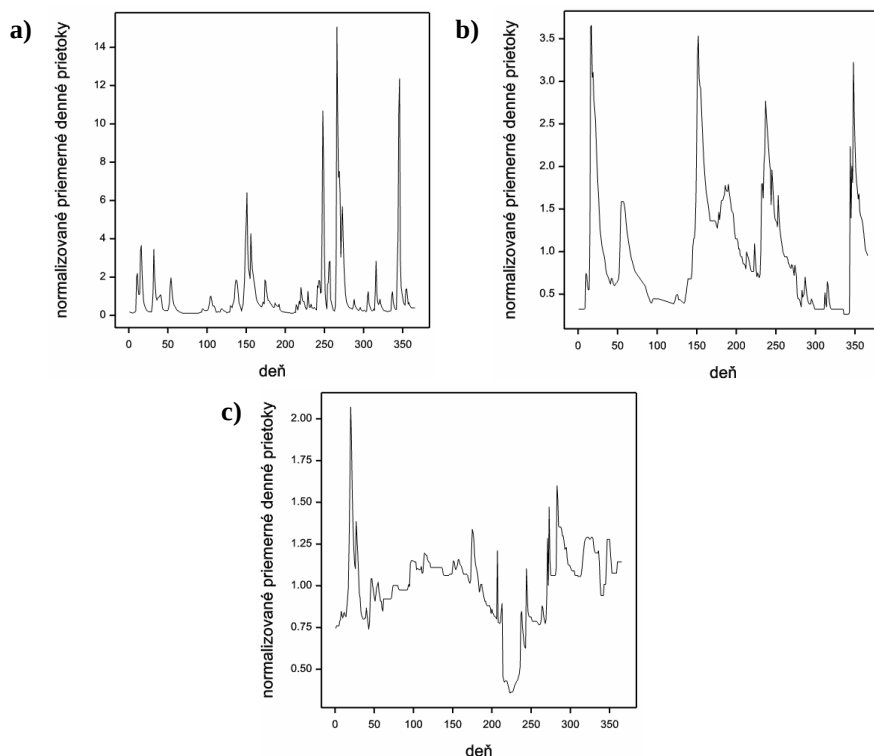
METODOLÓGIA

Hydrologickým prejavom povodňovej hrozby je napr. frekvencia povodňových situácií. Na základe početnosti povodňových situácií v povodí môžeme tvrdiť, že povodia s ich vysokou frekvenciou majú vysokú úroveň povodňovej hrozby a opačne, povodia, v ktorých je nízka frekvencia povodňových situácií majú nízku povodňovú hrozbu. Odvodenie úrovne povodňovej hrozby len na základe empiricky zistenej početnosti povodňových situácií by bolo korektné len za predpokladu, že podkladom na stanovenie početnosti povodňových situácií boli dlhodobé a systematické pozorovania. A to je problém. Informácie o výskyte povodňových situácií, ktoré sú získané na základe empirie, sú relatívne krátke. Možnosť ich rozšírenia o dobové záznamy v tlači, resp. kronikách sa spravidla týka len veľkých, katastrofických povodní. Ak ich

získavame z hydrologických pozorovaní na vodných tokoch, potom sú k dispozícii z obmedzeného počtu povodí.

Alternatívny spôsob identifikovania regionálnych tried povodňovej hrozby je založený na fyzicko-geografických atribútoch povodí a ich vplyve na základné črty odtokového procesu. Prvotnou príčinou vzniku povodňových situácií sú zrážkové, resp. klimatické situácie. Priestorová variabilita fyzicko-geografických atribútov povodí však spôsobuje, že rovnaké zrážky, ktoré spadnú na povodia s rozdielnymi fyzicko-geografickými vlastnosťami nemusia mať vždy za následok vznik povodňovej situácie. Transformácia zrážok do odtoku je zložitý proces (cf. Horton 1933, Betson 1964, Hewlett a Hibbert 1967, Dunne a Black 1970 a Waeyman 1970). Na základné črty odtokového procesu povodí však môže poukazovať napr. hydrogram priemerných denných prietokov (obr. 2). Hydrogram na obr. 2 (časť a) naznačuje, že dominantným odtokovým procesom v povodí je priamy odtok, ktorý vytvára náhle a strmé prietokové vlny. Maximálne hodnoty normalizovaných priemerných denných prietokov sú viac ako desaťnásobne vyššie v porovnaní s hodnotou priemerného ročného prietoku. Hydrogramy na obr. 2 (časť b a časť c) zas ukazujú, že prevládajúcou formou odtoku v povodiach je základný odtok. Pre túto formu odtoku sú typické plytké a dlhotrvajúce prietokové vlny s hodnotami normalizovaných priemerných denných prietokov len dva- až trikrát vyššími ako sú hodnoty priemerného ročného prietoku. V dôsledku rozdielneho spôsobu transformácie zrážok do odtoku spôsobeného fyzicko-geografickými atribútmi povodí môžeme tvrdiť, že v povodí toku Ladomírky je väčšia povodňová hrozba, a preto v tomto povodí môžeme očakávať vyššiu frekvenciu povodňových situácií ako v povodiach toku Rimavy a toku Lábu.

Hydrologické atribúty, charakterizujúce základné črty odtokového procesu, sú ale tiež k dispozícii len z obmedzeného počtu povodí s hydrologickým pozorovaním. Pre ostatné povodia je nevyhnutné základné črty odtokového procesu odvodiť z fyzicko-geografických atribútov. Preto prvým metodologickým problémom je identifikovanie tých fyzicko-geografických atribútov, ktoré rozhodujúcim spôsobom formujú základné črty odtokového procesu, a s nimi úzko súvisiaci výskyt povodňových situácií (hydrologické atribúty povodňovej hrozby). Druhým metodologickým problémom je vyčlenenie fyzicko-geografických tried povodňovej hrozby, a to na základe vzájomnej kombinácie fyzicko-geografických atribútov povodí, ktoré boli v prvom kroku identifikované ako významné. Tretím metodologickým problémom je testovanie rozdielov vo frekvencii povodňových situácií medzi vyčlenenými fyzicko-geografickými triedami povodňovej hrozby, ktoré naznačujú empirické údaje. Hodnoty frekvencie povodňových situácií, keďže reprezentujú len určitú časovú vzorku pozorovaní, nemajú charakter skutočných priemerov základného súboru (true population means). Preto je nevyhnutné otestovať, či je empirickými údajmi naznačený účinok fyzicko-geografických tried povodňovej hrozby na frekvenciu povodňových situácií systematický, alebo má len charakter náhodných zmien. Na základe výsledkov testovania je potom stanovený optimálny počet fyzicko-geografických tried povodňovej hrozby malých povodí majúcich status regionálnych tried.



Obr. 2. Príklady rôznej hydrologickej reakcie
a) tok Ladamírka, b) tok Rimava, c) tok Láb (Solín 2008)

Identifikovanie fyzicko-geografických atribútov ovplyvňujúcich priestorovú variabilitu hydrologických atribútov povodňovej hrozby

Základné črty odtokového procesu v povodí môžeme okrem slovného kvalitatívneho vyjadrenia, ktoré je výsledkom vizuálnej interpretácie obr. 2, vyjadriť aj kvantitatívnym spôsobom, a to formou base flow indexu (*BFI*). Hodnota *BFI* udáva podiel základného odtoku na celkovom odtoku. Vysoká hodnota *BFI* naznačuje, že v odtokom procese povodia dominuje základný odtok, naproti tomu nízka hodnota *BFI* signalizuje, že prevládajúcou formou odtoku v povodí je priamy odtok. Výber fyzicko-geografických atribútov, dôležitých z hľadiska priestorovej variability základných črt odtokového procesu a s nimi úzko súvisiacej frekvencie povodňových situácií, sa uskutočnil jednak grafickou metódou stĺpcových grafov (box plot), jednak formou porovnania aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií reprezentujúcich jednotlivé triedy fyzicko-geografických atribútov. V prvom prípade sa v rámci vybraného súboru 126 povodí s hydrologickým pozorovaním uskutočnila analýza závislosti medzi fyzicko-geografickými atribútmi povodia a hodnotami *BFI*. Hodnoty *BFI* sa stanovili metódou vypracovanou na Institute of Hydrology vo Wallingforde (1980), ktorá je súčasťou softvéru zrážkovo-

odtokového modelu IHACRES (Littlewood et al. 1997). Ako vstupné údaje do modelu sa použili hodnoty denného úhrnu zrážok a priemerné denné prietoky z roku 1980. Tento rok z hľadiska úhrnu zrážok predstavuje priemerný rok. V druhom prípade sa analýza priestorovej variability frekvencie povodňových situácií v závislosti od fyzicko-geografických atribútov povodia uskutočnila v rámci základného súboru povodí.

K fyzicko-geografickým atribútom uvedieme ešte stručnú poznámku. Kvalitatívne posúdenie vplyvu fyzicko-geografických atribútov povodia na odtokový proces je pomerne jednoznačné. Už menej jednoznačné je kvantitatívne vyjadrenie ich vplyvu na báze celého povodia (cf. Calder 1993, de Roo et al. 2001, Pivot et al. 2002, Andréssian 2004, Sullivan et al. 2004 a Wheeler 2006). Napr. v súvislosti s krajinou pokrývkou Andréssian (2004) konštatuje, že odlesnenie môže zvýšiť tak objem povodňových vln, ako aj hodnoty kulminačných prietokov, avšak účinok odlesnenia, resp. zalesnenia na povodňové atribúty je pri povodniach s veľkým intervalom opakovania minimálny, až žiadny. Podľa Calderu (1993) aj pri výskumoch, ktoré potvrdili zvýšenie objemu prietoku, ako aj kulminačných povodňových prietokov v dôsledku odlesnenia, je tendencia pripísať tento účinok skôr vedľajším sprievodným javom súvisiacich s procesom odlesňovania (napr. rozrušenie a zhutnenie pôdneho krytu), ako samotnému lesu.

Vyčlenenie fyzicko-geografických tried povodňovej hrozby

Cieľom regionálno-typizačného procesu je vyčleniť triedy povodňovej hrozby na základe vzájomnej kombinácie fyzicko-geografických atribútov, ktoré rozhodujúcim spôsobom ovplyvňujú priestorovú variabilitu *BFI* a frekvenciu povodňových situácií (hydrologické atribúty povodňovej hrozby). Zoskupovanie malých povodí do tried vzhľadom na ich fyzicko-geografické atribúty sa môže uskutočniť aplikáciou rôznych metód, napr. zhlukovou analýzou (Anderberg 1972), diskriminačnou analýzou (Lachenbruch 1975), metódou umelých neurónových sietí, fuzzy logikou (Hall a Minns 1999, Jingyi a Hall 2004) alebo metódou, ktorá je založená na aplikácii logických princípov (Grigg 1965 a Armand 1975). Vzhľadom na to, že počet fyzicko-geografických charakteristík povodí, ktoré sú významné z hľadiska objasnenia priestorovej variability základných črt odtokového procesu a s nimi súvisiaceho výskytu povodňových situácií nebýva veľký, je efektívne uskutočniť vyčleňovanie fyzicko-geografických tried povodňovej hrozby metódou logického delenia. Príklad klasifikačnej schémy logického delenia zobrazuje tab. 1. Treba zdôrazniť, že vyčlenené fyzicko-geografické triedy na jednotlivých hierarchických úrovniach majú vo vzťahu k základným črtám odtokového procesu a s nimi súvisiaceho výskytu povodňových situácií explanačnú funkciu. Preto sa očakáva, že z hľadiska hydrologických atribútov povodňovej hrozby budú triedy fyzicko-geografických atribútov vykazovať medzi sebou zreteľné diferenciácie.

Podľa Grigga (1965) sa konzistencia logického delenia dosiahne vtedy, ak sú dodržané nasledovné pravidlá:

- delenie je vyčerpávajúce, t. j. všetky indivíduá (priestorové jednotky) sú zaradené do tried,
- triedy sa v rámci hierarchickej úrovne navzájom vylučujú,

- na každej hierarchickej úrovni sa uplatňuje len delenie podľa jedného atribútu,
- atribút na vyššej hierarchickej úrovni je z hľadiska cieľa klasifikácie významnejší ako atribút nižšej hierarchickej úrovne.

Tab. 1. Hierarchická klasifikačná schéma logického delenia

A								A – univerzum
AX				AY				AX, AY – triedy I. hierarchickej úrovne
AXB		AXC		AYD		AYE		AXB, ..., AYE – triedy II. hierarchickej úrovne
AXB1	AXB2	AXC3	AXC4	AYD5	AYD6	AYD7	AYD8	AXB1,..., AYD8 – triedy III. hierarchickej úrovne

Testovanie tried povodňovej hrozby vyčlenených na základe vzájomnej kombinácie fyzicko-geografických atribútov povodí

Regionálny typ je priestorovo nesúvislou jednotkou v geografickom priestore a je základným výstupom priestorovej analýzy založenej na regionálno-taxonomicom koncepte (cf. Fischer 1987 a Bezák 1996). Vyčlenené triedy podľa tohto konceptu nadobúdajú charakter regionálnych tried len za predpokladu, že vo vzťahu k množine atribútov spĺňajú buď kritérium vnútornej homogenity, alebo vonkajšej heterogenity. Aplikácia regionálno-taxonomickeho konceptu v hydrogeografii, resp. hydrológii má však určité špecifikum. Triedy sú vyčleňované na základe fyzicko-geografických atribútov povodí, ale regionálny status sa hodnotí vo vzťahu k hydrologickým atribútom. Triedy povodňovej hrozby vyčlenené na základe vzájomnej kombinácie fyzicko-geografických atribútov povodí podmieňujúcich priestorovú variabilitu základných črt odtokového procesu a s nimi úzko súvisiaceho výskytu povodňových situácií nadobúdajú regionálny status vtedy, ak z hľadiska frekvencie povodňových situácií spĺňajú podmienku výraznej heterogenity, zachovávajúc si pritom medzi sebou určitú homogenitu v rámci regionálneho typu (cf. Solín 2005).

Frekvencia výskytu povodňových situácií fyzicko-geografických tried je reprezentovaná hodnotou aritmetického priemeru ($\bar{x}$), pričom

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n},$$

kde x_i – frekvencia výskytu povodňových situácií v i –povodí fyzicko-geografickej triedy, n – počet povodí fyzicko-geografickej triedy.

Jedenásťročné obdobie 1996-2006, z ktorého boli získané údaje o výskyte povodňových situácií, je pomerne krátke. Z nich vypočítané aritmetické priemery predstavujú hodnoty získané zo vzorky pozorovaní, nemajú teda charakter skutočných priemerov základného súboru (true population means). Je preto nevyhnutné posúdiť, či veľkosť rozdielov vo frekvencii povodňových situácií medzi triedami povodňovej hrozby je dostatočne výrazná na to, aby sme

mohli konštatovať, že vzniknuté diferencie vo frekvencii povodňových situácií sú výsledkom vplyvu vyčlenených fyzicko-geografických tried a nemajú náhodný charakter.

Testovanie významnosti rozdielov frekvencie povodňových situácií medzi triedami povodňovej hrozby sa uskutočnilo metódou analýzy rozptylu, patriacej do skupiny metód induktívnej štatistiky (Neter et al. 1985). Najskôr sa testovaním nulovej hypotézy (H_0), podľa ktorej očakávané stredné hodnoty početnosti povodňových situácií (μ_r) tried povodňovej hrozby sú si rovné, t. j.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_r$$

hodnotí fyzicko-geografická klasifikačná schéma ako celok. Zisťuje sa teda, či vôbec existuje závislosť medzi vyčlenenými triedami povodňovej hrozby a frekvenciou povodňových situácií. Testovacím kritériom je hodnota F^* - pomeru. Nulová hypotéza o rovnosti stredných hodnôt μ_r je zamietnutá vtedy, ak platí, že

$$F^* > F(1-\alpha, r-1; n_T - r), \text{ kde } (r-1, n_T - r)$$

sú stupne voľnosti pre čitateľa a menovateľa v F^* -pomere a

$$F(1-\alpha; r-1; n_T - r) \text{ je } (1-\alpha)100 \text{ percentil } F \text{ rozdelenia.}$$

Hladina významnosti α má pritom hodnotu pravdepodobnosti 0,01. Zamietnutie nulovej hypotézy znamená, že medzi fyzicko-geografickými triedami povodňovej hrozby a frekvenciou povodňových situácií existuje nejaká závislosť.

V prípade zamietnutia nulovej hypotézy o rovnosti stredných hodnôt μ_r , je opodstatnené pristúpiť k druhému kroku, a to k párovému porovnaniu a k testovaniu nulových hypotéz:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0, \dots, \mu_i - \mu_j = 0,$$

t. j., že rozdiely medzi očakávanými strednými hodnotami početnosti povodňových situácií medzi dvoma fyzicko-geografickými triedami povodňovej hrozby sú nulové. Testovanie sa uskutočnilo metódou LSD – *Fisher's protected least significant difference* (Hsu 1996). Kritériom pre testovanie rozdielov $\mu_i - \mu_j$ je štatistika

$$\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{s(\hat{D})\sqrt{2/n}} > t_{\alpha/v},$$

kde $\bar{x}_i - \bar{x}_j$ je rozdiel aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií dvoch porovnávaných tried povodňovej hrozby.

$$s(\hat{D})$$

je štandardná odchýlka rozdielov, $t_{\alpha/v}$ je kvantil t rozdelenia pre v stupňov voľnosti, n je počet povodí. Nulová hypotéza je zamietnutá, ak výraz na ľavej strane nerovnosti je väčší ako kvantil t rozdelenia. Zamietnutie nulovej

hypotézy znamená, že medzi porovnávanými fyzicko-geografickými triedami povodňovej hrozby existujú štatisticky významné rozdiely z hľadiska stredných hodnôt frekvencie povodňových situácií. Trieda povodňovej hrozby nadobúda status regionálneho typu v prípade, ak pri vzájomnom párovom porovnávaní aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií sú štatisticky významné všetky rozdiely. Na štatistické výpočty a testovanie uvedených hypotéz sa použil komerčný štatistický softvér GENSTAT od VSN International Ltd.

VÝSLEDKY

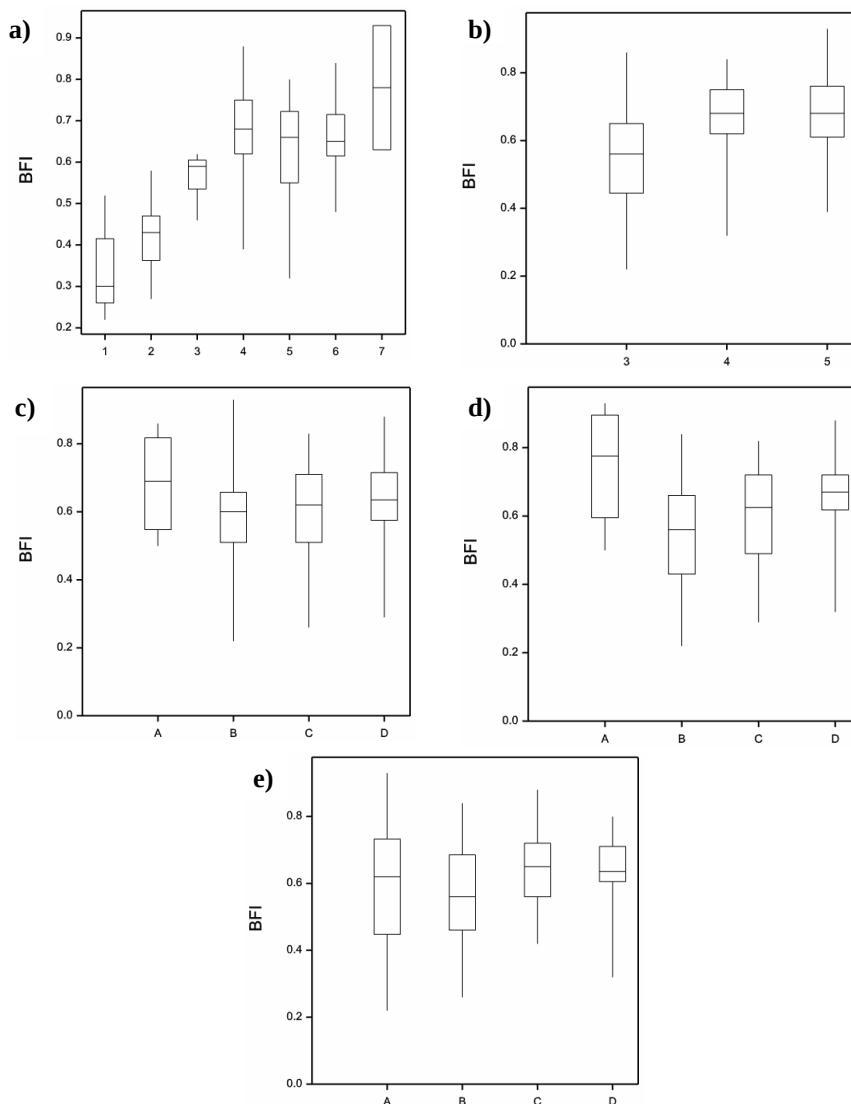
Fyzicko-geografické atribúty povodí spôsobujúce priestorovú variabilitu základných črt odtokového procesu a výskytu povodňových situácií

Výsledky grafickej analýzy priestorovej variability *BFI* v závislosti od fyzicko-geografických atribútov, ktorá sa uskutočnila v rámci vybraného súboru 126 povodí, sú zobrazené na obr. 3. Z uvedených grafov vyplýva, že na priestorovú diferenciáciu hodnôt *BFI* má výrazný vplyv len priepustnosť pôdnej textúry. So stúpajúcou priepustnosťou pôdnej textúry povodí sa zvyšujú hodnoty *BFI*. Táto závislosť však rovnomerne nestúpa od triedy 1 priepustnosti pôdnej textúry po triedu 7. Veľmi malé rozdiely strednej hodnoty *BFI* sú medzi triedami priepustnosti pôdnej textúry 4, 5 a 6. Trieda 7 obsahuje len dve povodia. Priepustnosť je schopnosťou pôdy prepúšťať zrážkovú vodu z povrchu do hlbších pôdnych horizontov. Z hľadiska infiltrácie je priepustnosť reprezentovaná hodnotou minimálnej infiltračnej kapacity (Váša a Drbal 1975). V súvislosti s textúrou pôdy percento nekapilárnych pórov ubúda od hrubozrnných kategórií smerom k jemnozrnným kategóriám (Bedrna et al. 1989). V dôsledku toho priepustnosť klesá od hrubozrnných kategórií smerom k jemnozrnným a podiel základného odtoku na celkovom odtoku sa zvyšuje od povodí s prevahou jemnozrnných kategórií (1) smerom k povodiam s prevahou hrubozrnných kategórií pôdnej textúry (7). Napr. hodnota *BFI* povodia na obr. 2 (časť a), ktoré je budované paleogénnym flyšom s prevahou ílovcov s veľmi málo priepustnou pôdnou textúrou, je 0,26 a hodnota *BFI* povodí na obr. 2 (časť b a časť c), ktoré sa vyznačujú priepustnou, resp. veľmi priepustnou pôdnou textúrou na kryštallických bridliciach, resp. viatych pieskoch, je 0,68, resp. 0,93.

Vplyv štruktúry pôdy (IPS), reliéfových atribútov a lesnatosti na priestorovú diferenciáciu *BFI* je zanedbateľný. V prípade tried pôdnej štruktúry sa vychádza z predpokladu, že priepustnosť sa zmenšuje od štruktúrnych agregátov rovnomerne vyvinutých v troch smeroch k štruktúrnym agregátom vertikálne a horizontálne pretiahnutým. Zvyšovanie hodnôt *BFI* od triedy 3 k triede 5 je však nevýrazné. Triedu 3 tvoria povodia s prevahou pôdnych typov, pre ktoré je typická prizmatická a stĺpovitá štruktúra s vertikálne pretiahnutými pôdnymi agregátmi, triedu 4 povodia s prevahou pôdnych typov s príznačnou kockovitou a polyedrickou štruktúrou s hranami zreteľne vyvinutými v troch smeroch a triedu 5 povodia s prevahou pôdnych typov, pre ktoré je typická hrudovitá – až hrudkovitá štruktúra s guľovitými pôdnymi agregátmi. Rovnako nevýrazné rozdiely medzi strednými hodnotami *BFI* pozorujeme aj medzi triedami lesnatosti, priemerného sklonu a priemernej nadmorskej výšky povodia.

S diferenciáciou základných črt odtokového procesu úzko súvisí priestorová variabilita frekvencie povodňových situácií. Preto by sa mala naznačená

štruktúra závislostí prejavíť aj pri priamom porovnaní frekvencie povodňových situácií s fyzicko-geografickými atribútmi povodí. Výsledky sú uvedené v tab. 2 až tab. 5.



Obr. 3. Závislosť BFI vs. fyzicko-geografické atribúty povodia

a) triedy priepustnosti pôdnej textúry: 1 – nepriepustná, 2 – veľmi málo priepustná, 3 – málo priepustná, 4 – priepustná, 5 – dobre priepustná, 6 – veľmi dobre priepustná, 7 – absolútne priepustná, b) triedy priepustnosti pôdnej štruktúry: 3 – prizmatická až stĺpcovitá, 4 – kockovitá až polyedrická, 5 – hrudovitá, c) triedy lesnatosti: A – 0-24 %, B – 24-51 %, C – 51-76 %, D – 76-100 %, d) triedy priemernej sklonu: A – 0-6°, B – 6-12°, C – 12-18°, D – 18-33°, e) triedy priemernej nadmorskej výšky: A – 101-385 m n. m., B – 385-652 m n. m., C – 652-976 m n. m., D – 976-1 816 m n. m.

Tab. 2. Priepustnosť pôdnej textúry povodia vs. frekvencia povodňových situácií

Triedy priepustnosti pôdnej textúry	Počet povodí	Aritmetický priemer frekvencie povodňových situácií
1	269	0,88
2	317	0,45
3	313	0,70
4	341	0,49
5	339	0,40
6	137	0,32
7	62	0,40

Tab. 3. Lesnatosť povodia vs. frekvencia povodňových situácií

Fyzicko-geografické triedy	Počet povodí	Aritmetický priemer frekvencie povodňových situácií
A – 0-24 %	314	0,44
B – 24-51 %,	420	0,86
C – 51-76 %	517	0,62
D – 76-100 %	427	0,18

Tab. 4. Priemerný sklon povodia vs. frekvencia povodňových situácií

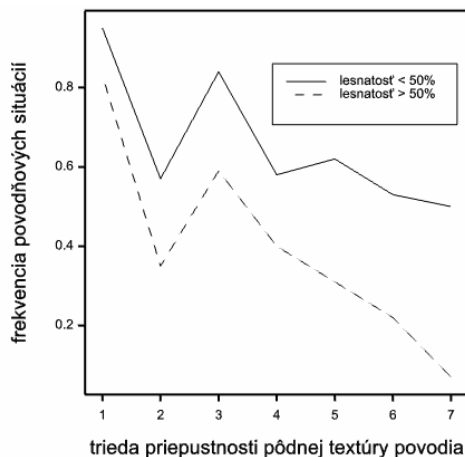
Fyzicko-geografické triedy	Počet povodí	Aritmetický priemer frekvencie povodňových situácií
A – 0-6°	417	0,42
B – 6-12°	589	0,68
C – 12-18°	487	0,57
D – 18-33°	185	0,26

Tab. 5. Priemerná nadmorská výška povodia vs. frekvencia povodňových situácií

Fyzicko-geografické triedy	Počet povodí	Aritmetický priemer frekvencie povodňových situácií
A – 101-385 m n.m	633	0,43
B – 385-652 m n.m	558	0,67
C – 652-976 m n.m	380	0,62
D – 976-1816 m n.m	107	0,16

V súvislosti s triedami priepustnosti pôdnej textúry povodia, podobne ako v prípade *BFI*, sú rozdiely medzi triedami pôdnej textúry 4, 5, 6 a 7 z hľadiska aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií malé, nevýrazné. Hodnoty aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií v týchto triedach sú však zreteľne nižšie oproti triedam s málo priepustnou pôdnou textúrou 1 a 3. Prekvapujúco nízka hodnota frekvencie povodňových situácií je však v prípade triedy 2. S výnimkou triedy A, v ktorej má aritmetický priemer frekvencie povodňových situácií pomerne nízku hodnotu, poukazuje táto štatistická miera v triedach B, C a D na znižovanie frekvencie povodňových situácií so zvyšujúcou sa lesnatosťou povodia. Rozdiely medzi aritmetickými priermi sú pritom pomerne výrazné. V súvislosti s reliéfovými atribútmi údaje o frekvencii povodňových situácií, podobne ako v prípade *BFI*, nepotvrdzujú predpoklad, že so zvyšovaním priemerného sklonu povodia, resp. nadmorskej výšky sa bude zvyšovať frekvencia povodňových situácií. Údaje poukazujú skôr na opačnú tendenciu.

Z uvedenej analýzy vyplýva, že okrem priepustnosti pôdnej textúry povodia je druhým fyzicko-geografickým atribútom, ktorý významnejším spôsobom ovplyvňuje priestorovú variabilitu frekvencie povodňových situácií, lesnatosť povodia. Vplyv lesnatosti na frekvenciu povodňových situácií sa ešte výraznejšie prejaví, ak sa posudzuje v rámci jednotlivých tried priepustnosti pôdnej textúry (obr. 4).



Obr. 4. Frekvencia povodňových situácií v rámci tried priepustnosti pôdnej textúry pri rôznej lesnatosti

V rámci každej z tried priepustnosti pôdnej textúry sú hodnoty aritmetického priemeru frekvencie povodňových situácií vyššie v skupine povodí s prevládajúcou lesnatosťou ako v skupine povodí, v ktorých lesnatosť neprevláda. Graf tiež naznačuje, že vplyv lesnatosti na výskyt povodňových situácií slabne so znižovaním priepustnosti pôdnej textúry povodí.

Identifikovanie regionálnych typov povodňovej hrozby

Vyčlenenie tried povodňovej hrozby

Z výsledkov, ktoré sú prezentované v predchádzajúcej časti, vyplýva vyčlenenie tried povodňovej hrozby na základe vzájomnej kombinácie priepustnosti pôdnej textúry povodia (atribút I. hierarchickej úrovne) a lesnatosti povodia (atribút II. hierarchickej úrovne). V prípade oboch atribútov však empirické údaje ukazujú, že nie všetky medzitriedne rozdiely *BFI* a frekvencie povodňových situácií sú výrazné, preto je efektívne modifikovať triedy fyzicko-geografických atribútov ešte predtým, ako sa pristúpi k vytvoreniu hierarchickej klasifikačnej schémy na základe ich vzájomnej kombinácie. Hodnoty *BFI* a frekvencie povodňových situácií naznačujú, že je opodstatnené pôvodných sedem tried priepustnosti pôdnej textúry zredukovať a vytvoriť na hierarchickej úrovni I len dve triedy priepustnosti pôdnej textúry: triedu A (TPPT A), ktorá vznikla zlúčením tried 1 až 3 a triedu B (TPPT B), ktorá zahrnuje triedy 4 až 7. Zredukovaný bol aj počet tried lesnatosti. Z pôvodných štyroch tried sa

vytvorili dve triedy lesnatosti. Do prvej skupiny patria povodia, ktorých lesnatosť z celkovej plochy povodia je menej ako 50 % ($L < 50$ %) a v druhej skupine sú povodia s viac ako 50 % lesnatosťou z celkovej plochy povodia ($L \geq 50$ %). Na II. hierarchickej úrovni sa teda triedy I. hierarchickej úrovne z hľadiska lesnatosti rozdelili na dve podtriedy. Vzájomnou kombináciou dvoch tried priepustnosti pôdnej textúry a dvoch tried lesnatosti sa tak vytvorili štyri fyzicko-geografické triedy povodňovej hrozby (tab. 6.).

Tab. 6. Klasifikačná schéma tried povodňovej hrozby

TPPT A		TPPT B	
$L < 50$	$L \geq 50$	$L < 50$	$L \geq 50$
A	B	C	D

Triedu A povodňovej hrozby tvoria povodia, ktorých priepustnosť pôdnej textúry je v intervale od nepriepustnej po málo priepustnú (TPPT A) a s lesnatosťou pod 50 % ($L < 50$).

Triedu B povodňovej hrozby tvoria povodia, ktorých priepustnosť pôdnej textúry je v intervale od nepriepustnej po málo priepustnú (TPPT A) a s lesnatosťou nad 50 % ($L \geq 50$).

Triedu C povodňovej hrozby tvoria povodia, ktorých priepustnosť pôdnej textúry je v intervale priepustná až absolútne priepustná (TPPT B) a s lesnatosťou pod 50 % ($L < 50$).

Triedu D povodňovej hrozby tvoria povodia, ktorých priepustnosť pôdnej textúry je v intervale priepustná až absolútne priepustná (TPPT B) a s lesnatosťou nad 50 % ($L \geq 50$).

Účinok tried obidvoch faktorov na frekvenciu povodňových situácií je vyjadrený v tab. 7. Hodnoty v bunkách vyjadrujú spoločný účinok tried priepustnosti pôdnej textúry a lesnatosti na hodnotu aritmetického priemeru frekvencie povodňových situácií. Hodnoty v poslednom riadku a stĺpci, ktoré sú označené ako „priemer riadku“ a „priemer stĺpca“, vyjadrujú vplyv obidvoch atribútov na frekvenciu povodňových situácií jednotlivo.

Tab. 7. Účinok vzájomného pôsobenia tried priepustnosti pôdnej textúry a lesnatosti na frekvenciu povodňových situácií

	TPPT_A	TPPT_B	Priemer riadku
$L \geq 50$ %	0,58	0,31	0,44
$L < 50$ %	0,77	0,58	0,68
Priemer stĺpca	0,66	0,42	0,54

Priemery stĺpca udávajú vyššiu úroveň povodňových situácií v triede povodí s menej priepustnou pôdnou textúrou ako v triede povodí s dobrou priepustnou pôdnou textúrou. Taktiež riadkové priemery v súvislosti s lesnatosťou udávajú

vyššiu frekvenciu povodňových situácií v skupine povodí s $L < 50 \%$ ako v skupine povodí s $L \geq 50 \%$. Pokiaľ ide o spoločný účinok tried priepustnosti pôdnej textúry a lesnatosti (triedy povodňovej hrozby), výrazný rozdiel vidíme medzi triedou A a D. Naproti tomu žiadny rozdiel nie je vo frekvencii povodňových situácií medzi triedou B a C, preto ich treba zlúčiť do jednej. Po tejto úprave je teda povodňová hrozba najvyššia v povodiach so slabou priepustnou pôdnou textúrou a nízkou lesnatosťou (trieda povodňovej hrozby A) a naopak najnižšia je v zalesnených povodiach s dobrou priepustnosťou pôdnej textúry (trieda povodňovej hrozby C). Triedy B a C tvoria strednú úroveň povodňovej hrozby (trieda povodňovej hrozby B) so vzájomným vyvažovaním vplyvov obidvoch atribútov. Zvyšovanie frekvencie povodňových situácií v dôsledku slabej priepustnosti pôdnej textúry je zmierňované zvýšenou lesnatosťou a opačne, nižšia úroveň frekvencie povodňových situácií v dôsledku dobrej priepustnosti pôdnej textúry je zvyšovaná odlesnením povodia.

Testovanie heterogenity tried povodňovej hrozby z hľadiska frekvencie povodňových situácií

V úvodnom, predbežnom hodnotení závislosti medzi frekvenciou povodňových situácií na jednej strane a triedami povodňovej hrozby na strane druhej sa ukázalo ako opodstatnené vyčleniť na základe vzájomnej kombinácie tried priepustnosti pôdnej textúry a tried lesnatosti tri triedy povodňovej hrozby. Empirické hodnoty aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií (tab. 8) naznačujú výrazné rozdiely medzi triedami povodňovej hrozby. Ich veľkosť je však nevyhnutné posúdiť metódami indukčnej štatistiky, aby sme mohli konštatovať, že vzniknuté diferencie vo frekvencii povodňových situácií sú výsledkom vplyvu tried povodňovej hrozby a nemajú náhodný charakter. Výsledky analýzy rozptylu a párového porovnania rozdielov sú prezentované v tab. 9 a 10.

Tab. 8. Aritmetické priemery frekvencie povodňových situácií v upravených triedach povodňovej hrozby

Trieda povodňovej hrozby	A	B	C
Aritmetický priemer frekvencie povodňových situácií	0,77	0,57	0,31
Počet povodí	346	812	520

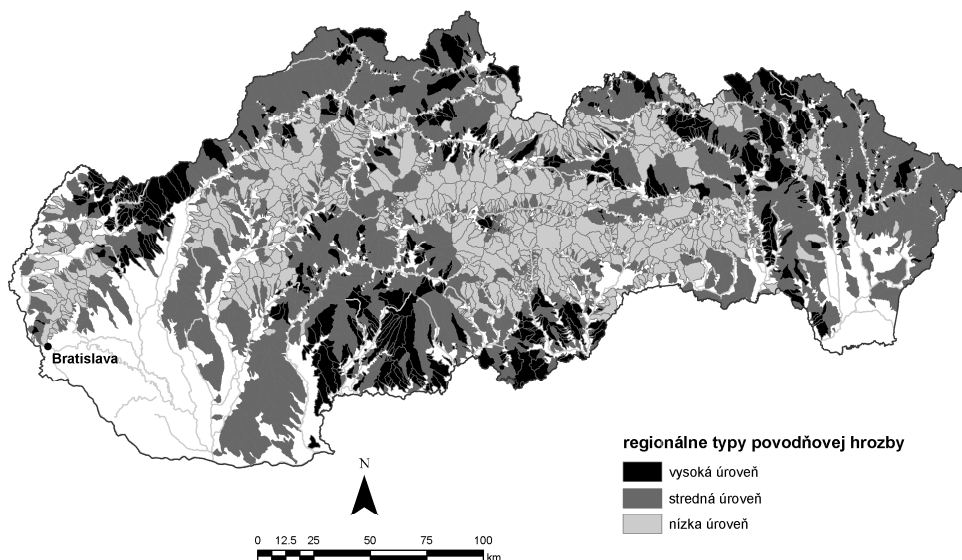
Tab. 9. Výsledky analýzy rozptylu

Zdroj rozptylu	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
PHR	2	46,9316	23,4658	23,48	<,001
Residuálny	1 675	1 674,2776	0,9996		
Celkom	1 677	1 721,2092			

Tab. 10. Výsledky párového porovnania rozdielov

Priemer	vs	Priemer	t	Významnosť
C		B	-4,808	Áno
C		A	-6,614	Áno
B		A	-2,951	Áno

Hodnota F -pomery (Tab. 9) s pravdepodobnosťou menšou ako 0,001 zamietajú hypotézu o rovnosti očakávaných stredných hodnôt frekvencie povodňových situácií. Taktiež párové porovnanie ukázalo, že rozdiely medzi aritmetickými priermi frekvencie povodňových situácií reprezentujúcich jednotlivé triedy povodňovej hrozby sú štatisticky významné (tab. 10). Môžeme teda konštatovať, že vyčlenené tri triedy povodňovej hrozby majú charakter regionálnych typov a z hľadiska počtu tried je to optimálne rozdelenie. Klasifikácia malých povodí Slovenska do troch regionálnych typov povodňovej hrozby je zobrazená na obr. 5.



Obr. 5. Klasifikácia malých povodí do regionálnych typov povodňovej hrozby

DISKUSIA A ZÁVER

Odtok je zložitý proces ovplyvňovaný mnohými faktormi. V súvislosti s jeho väzbou na fyzicko-geografické znaky a priestorovú variabilitu povodňovej hrozby sme sa zamerali len na tie atribúty, o ktorých sa predpokladá, že formujú jeho základné črty. Preto sme abstrahovali od vplyvu atribútov povodia meniacich sa v čase, napr. vlhkosť pôdy, ako aj od detailných znakov krajiny pokrývky a využívania zeme, ovplyvňujúcich proces infiltrácie.

V súvislosti s povodňovými situáciami sa zobraли do úvahy len povodňové situácie spôsobené prívalovými alebo dlhotrvajúcimi dažďami, resp. topením sa snehu. Nezohľadňovali sa povodňové situácie spôsobené ľadovými záťarasami, vnútornými vodami alebo pretrhnutím hrádzí. Podkladom pre selekciu povodňových situácií bola ich databáza z obdobia 1996-2006, ktorá okrem lokality a dátumu výskytu povodňovej situácie obsahuje aj informáciu o jej type.

Príčinou vzniku povodňových situácií môžu okrem systematických faktorov byť aj rôzne náhodné lokálne faktory, ako napr. nedostatočná prietoknosť premostení alebo údržba brehov koryta vodného toku. V materiáloch, z ktorých sa čerpali poznatky o povodňových situáciách, sa informácie o náhodných lokálnych faktoroch objavovali zriedkavo. Ani v takýchto prípadoch sa však nedá povedať, že by lokálne faktory boli primárnou príčinou vzniku povodňovej situácie, skôr len určitým spôsobom urýchlili jej vznik. Preto povodňové situácie, v ktorých sa lokálne faktory podieľali na ich vzniku, neboli vylúčené z analýzy.

Vzhľadom na to, že medzi viacerými triedami priepustnosti pôdnej textúry povodia nie sú výrazne rozdiely, či už hľadiska *BFI* alebo frekvencie povodňových situácií, je z pohľadu identifikovania regionálnych tried povodňovej hrozby kľúčovým problémom redukcia počtu tried priepustnosti pôdnej textúry. Napr. frekvencia povodňových situácií (tab. 2) z hľadiska rozdielov medzi triedami naznačuje, že je postačujúce vyčleniť len dve triedy priepustnosti pôdnej textúry. Prvú triedu by tvorila trieda priepustnosti pôdnej textúry 1 a druhú všetky ostatné triedy priepustnosti pôdnej textúry. Graf *BFI* vs. triedy priepustnosti pôdnej textúry však naznačuje niekoľko spôsobov redukcie. V práci Solína (2008) bol pôvodný počet sedem tried najskôr zredukovaný na štyri: (prvá trieda obsahuje triedy pôdnej textúry 1 a 2, druhá 3 a 4, tretia 5 a 6 a štvrtá triedu tvorí 7 trieda priepustnosti pôdnej textúry). Po ich vzájomnej kombinácii s dvoma triedami lesnatosti a na základe ich konfrontácie s počtom obcí sa vyčlenili štyri triedy povodňovej hrozby, ktorých základom sú tri triedy priepustnosti pôdnej textúry (tab. 11). Nato, že takéto vyčlenenie tried povodňovej hrozby nie je optimálne, poukazuje už ich empirická verifikácia prostredníctvom frekvencie povodňových situácií v povodiach (THP4 – 0.71, TPH3 – 0.52, THP2 – 0.38, TPH1 – 0.40). Medzi TPH2 a TPH1 je veľmi malý rozdiel v hodnotách aritmetických priemerov frekvencie povodňových situácií. V tejto štúdii aplikovaná redukcia pôvodných sedem tried na dve triedy pôdnej textúry, a to TPPT A (obsahujúca triedy pôdnej textúry 1, 2 a 3) a TPPT B (triedy pôdnej textúry 4, 5, 6 a T7), ktorá je preukaznejšia z hľadiska rozdielov medzi hodnotami *BFI* než redukcia v práci Solín (2008).

Tab. 11. Modifikovaná klasifikačná schéma tried povodňovej hrozby (Solín 2008)

Trieda povodňovej hrozby (TPH)	Index priepustnosti povodia (I_p)	Lesnatosť (L)
TPH 4 – veľmi vysoká	$I_p = 1, 2, 3, 4$	$L < 51 \%$
TPH 3 – vysoká	$I_p = 1, 2, 3, 4$	$L \geq 51 \%$
TPH 2 – mierna	$I_p = 5, 6$	$L < 51 \%, L \geq 51 \%$
TPH 1 – nízka	$I_p = 7$	$L < 51 \%, L \geq 51 \%$

Vizuálne porovnanie mapy priestorovej variability povodňového potenciálu (Minár et al. 2005) s mapou regionálnych typov povodňovej hrozby naznačuje, že medzi mapami sú značné rozdiely. Tie sú výsledkom aplikácie nielen rozdielných priestorových jednotiek, ale sú spôsobené predovšetkým stanovením rozdielných fyzicko-geografických atribútov rozhodujúcim spôsobom ovplyvňujúcich priestorovú variabilitu povodňového potenciálu resp. povodňovej hrozby. Prístup, ktorý uplatnil Minár et al. (2005), je založený na vzájomnej kombinácii jednotlivých komponentov krajiny, výsledkom ktorej sú homogénne areály z hľadiska vlastností reliéfu, pôdy alebo krajiny pokrývky. Z atribútov odtokového procesu je pritom dôraz položený na rýchlosť povrchového odtoku. Priestorová diferenciácia rýchlosti odtoku je výsledkom gravitačnej energie, ktorá podľa autorov rozhodujúcim spôsobom ovplyvňuje priebeh odtoku a vznik povodňových situácií a teda aj úroveň povodňového potenciálu. Vplyv sklonu a horizontálnej členitosti na rýchlosť pohybu vody sa veľmi zreteľne prejavuje tak na syntetickom parciálnom geoekologickom povodňovom potenciáli, ako aj na celkovom povodňovom potenciáli (zohľadnený je aj vplyv zrážok s priemernou dobou opakovania 100 rokov). Vyčlenené triedy povodňového potenciálu však nie sú konfrontované s empirickým výskytom povodňových situácií. V tejto štúdii je základnou priestorovou jednotkou hodnotenia povodňovej hrozby malé povodie. V súvislosti s povodňovou hrozbou sa z atribútov odtokového procesu zdôrazňuje genetická štruktúra odtoku. Rozhodujúcim fyzicko-geografickým atribútom jej priestorovej variability je priepustnosť pôdnej textúry povodia. Vplyv parametrov reliéfu sa nepreukázal ako významný z hľadiska priestorovej variability genetickej štruktúry odtoku a s ňou súvisiacou frekvenciou povodňových situácií. Triedy povodňovej hrozby vyčlenené na základe kombinácie tried fyzicko-geografických atribútov povodí sú verifikované frekvenciou povodňových situácií, ktoré sa v malých povodiach vyskytli v období 1996-2006. Ako optimálne sa pritom ukázalo vyčlenenie troch regionálnych typov povodňovej hrozby.

Identifikovanie regionálnej variability potenciálnej povodňovej hrozby povodí poskytuje pre orgány štátnej správy a samosprávy, ako aj organizácie hospodáriace v povodiach základnú informáciu o tom, v ktorých povodiach je potrebné naliehavo, prioritne riešiť preventívnu ochranu pred povodňami. V prípade obmedzených verejných finančných zdrojov je mapa povodňovej hrozby relatívne objektívnym kritériom pre prednostné pridelenie finančných zdrojov na vypracovanie návrhu a podporu realizácie preventívnych protipovodňových opatrení obciam v povodiach s vyššou úrovňou povodňovej hrozby.

Rozdielna úroveň povodňovej hrozby ovplyvňuje charakter manažmentu povodňového rizika. Napríklad v povodiach s vysokou úrovňou povodňovej hrozby bude redukcia rozsahu zaplavenia prostredníctvom zmien vo využívaní krajiny menej účinná ako v povodiach so strednou alebo nízkou úrovňou povodňovej hrozby. Pravdepodobne efektívnejšia bude stratégia zameraná na: 1) redukciu lokálnych faktorov urýchľujúcich vznik povodňových situácií udržiavaním prietoku, čistoty korýt a prietokových zón, 2) zmierňovanie negatívnych dôsledkov spôsobených povodňou formou zvýšenia povedomia obyvateľov o povodňovom nebezpečenstve, a to lepšou organizáciou zabezpečovacích a záchranných prác, ako aj informovanosťou o spôsoboch zatesnenia objektov i o možnostiach poistenia voči škodám spôsobených

povodňou. Dôraz by sa mal klásť tiež na vytvorenie podmienok pre čo najrýchlejšiu obnovu povodňou postihnutých lokalít.

V príspevku prezentovaný prístup identifikovania regionálnej variability povodňovej hrozby sa vyznačuje tým, že základnou jednotkou priestorovej analýzy povodňovej hrozby je malé povodie. Triedy povodňovej hrozby vyčlenené na základe vzájomnej kombinácie tried priepustnosti pôdnej textúry povodia a lesnatosti sú verifikované výskytom povodňových situácií metódami indukčnej štatistiky. Ako optimálna sa ukázala klasifikácia základného súboru malých povodií do troch regionálnych typov povodňovej hrozby. Identifikovanie regionálnych typov povodňovej hrozby malých povodií predstavuje základný rámec na pozadí ktorého by sa malo pristupovať k integrovanému manažmentu ich povodňového rizika.

Príspevok bol riešený v rámci projektu 2/0138/09 „Regionálna variabilita povodňového rizika v malých povodiach SR“, ktorý je finančne podporovaný grantovou agentúrou VEGA.

LITERATÚRA

- ANDERBERG, M. R. (1972). *Cluster analysis for applications*. New Mexico (NTIS).
- ANDRÉSSIAN, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1-27.
- ARMAND, D. L. (1975). *Nauka o landšafte*. Moskva (Mysl').
- BANKOFF, G. (2001). Rendering the world unsafe: "vulnerability" as western discourse. *Disasters*, 25, 19-35.
- BEDRNA, Z., FULAJTAR, E., ZRUBEC, F., JURÁNI, B. (1989). *Pôdne režimy*. Bratislava (Veda, SAV).
- BETSON, R., P. (1964). What is watershed runoff? *Journal of Geophysical Research*, 69, 1541-1551.
- BEZÁK, A. (1996). Regional taxonomy: a review of problems and methods. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 28, 43-59.
- BROWN, J. D., DAMERY, S. L. (2002). Managing flood risk in the UK: towards an integration of social and technical perspectives. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 27, 412-426.
- CALDER, I. R. (1993). Hydrologic effects of land-use change. In Maidment, R. D., ed. *Handbook of hydrology*. New York (McGraw-Hill).
- COM (2004). *Flood risk management. Flood prevention, protection and mitigation*. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Region 2004 (472). Brussels.
- DEFRA (2000). *Guidelines for environmental risk assessment and management*. London (Defra).
- De LOE, R. (2000). Floodplain management in Canada: overview and prospects. *The Canadian Geographer*, 44, 355-368.
- De ROO, A., ODIJIK, M., SHMUCK, G., KOSTER, E., LUCHEER, A. (2001). Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Order catchment. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 26, 593-599.
- DUNNE, T., BLACK, R., D. (1970). Partial area contribution to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 6, 1296-1311.
- FAŠKO, P. (1999). *Mapa izohyet priemerných ročných úhrnov zrážok 1931-1980 v mierke 1:750 000*. Bratislava (SHMÚ).

- FERANEC, J., OŤAHEL, J., PRAVDA, J. (1996). *Krajinná pokrývka Slovenska - identifikovaná metódou CORINE Land Cover*. Geographia Slovaca 11, Bratislava (Geografický ústav SAV).
- FISCHER, M. M. (1987). Some fundamental problems in homogeneous and functional regional taxonomy. *Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung*, 11, 264-282.
- FLEMING, G. (2002). How can we learn to live with rivers? The findings of the Institution of Civil Engineers Presidential Commission on flood-risk management. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360, 1527-1530.
- GREEN, C. (2004). The evaluation of vulnerability to flooding. *Disaster Prevention and Management*, 4, 323-329.
- GREŠKOVÁ, A. (2001). Identifikácia rizikových oblastí a rizikových faktorov vzniku povodní v malých povodiach. *Geografický časopis*, 53, 247-268.
- GREŠKOVÁ, A. (2002). Relevantné faktory vzniku a podmienky formovania sa povodňových prietokov v povodí Krupinice v roku 1999. *Geographia Slovaca*, 18, 39-47.
- GRIGG, D. (1965). The logic of regional systems. *Annals of the Association of American Geographers*, 55, 465-491.
- Institute of Hydrology (1980). *Low flow studies report*. Wallingford (Institute of Hydrology).
- JINGYI, Z., HALL, M. J. (2004). Regional flood frequency analysis for the Gan-Ming river basin in China. *Journal of Hydrology*, 296, 98-117.
- HALL, M. J., MINNS, A. V. (1999). The classification of hydrologically homogeneous regions. *Hydrological Sciences Journal*, 45, 693-704.
- HEWLETT, J. D., HIBBERT, A. R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper, W. E., Lull, H. W., eds. *International symposium on forest hydrology*. Oxford (Pergamon), pp. 275-290.
- HOFIERKA, J., ŠÚRI, M., CEBECAUER, T. (1998). Rastrové digitálne modely reliéfu a ich aplikácie. *Acta Facultatis Studiorum Humanitatis et Naturae Universitatis Prešovensis, Prírodné vedy*, 30, *Folia Geographica*, 2, 208-217.
- HMÚ (1965). *Hydrologické pomery ČSSR I*. Praha (Hydrometeorologický ústav).
- HORTON, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions American Geophysical Union*, 14, 446-460.
- HSU, J. C. (1996). *Multiple comparison*. Boca Raton (Chapman).
- LACHENBRUCH, P. A. (1975). *Discriminant analysis*. London (Hafner).
- LITTLEWOOD, I. G., DOWN, K., PARKER, J. R., POST, D. A. (1997). *IHACRES v1.0*. Wallingford (Centre for Ecology and Hydrology), Canberra (Integrated Catchment Assessment and Management Centre, Australian National University).
- MESSNER, F., MEYER, V. (2005). *Flood damage, vulnerability and risk perception – challenge for flood damage research*. UFZ – Discussion papers, 13. Leipzig, Halle (UFZ Department of Economics).
- MEYER, V., MESSNER, F. (2005). *National flood damage evaluation methods. A review of applied methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany*. UFZ – Discussion papers, 21. Leipzig, Halle (UFZ Department of Economics).
- MEYER, V., HAASE, D., SCHEUER, S. (2007). *GIS-based multicriteria analysis as decision support in flood risk management*. UFZ – Discussion papers, 6. Leipzig, Halle (UFZ Department of Economics).
- MINÁR, J., TRIZNA, M., BARKA, I., BONK, R. (2005). *Povodňový potenciál na území Slovenska*. Bratislava (Geo-grafika).
- MORROW, B. H. (1999). Identifying and mapping community vulnerability. *Disasters*, 23, 1-18.
- NETER J., WASSERMAN, W., KUTNER, R. M. (1985). *Applied linear statistical models*. Illinois (Home Wood).

- PENNING-ROUSELL, E., FLOYD, P., RAMSBOTTOM, D., SURENDRAN, S. (2005). Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework. *Natural Hazards*, 36, 43-64.
- PLATE, E. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267, 2-11.
- PIVOT, J. M., JOSIEN, E., MARTIN, P. (2002). Farms adaptation to changes in flood risk: a management approach. *Journal of Hydrology*, 267, 12-25.
- PORUBSKÝ, A. (1980). Hydrogeológia. In Mazúr, E., ed. *Atlas SSR*. Bratislava (Geografický ústav SAV, Slovenský úrad geodézie a kartografie).
- SAYERS, P. B., GOULDBY, B. P., SIMM, J. D., MEADOWCROFT, J., HALL, J. (2003). *Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defence – a review*. R&D Technical report FD2302/TR1. Wallingford (Defra/Environment Agency).
- SIEGRIST, M., GUTSCHER, H. (2008). Natural hazards and motivation for mitigation behavior: people cannot predict the affect evoked by a severe flood. *Risk Analysis*, 28, 771-778.
- SIMPSON, D. M., HUMAN, R. J. (2008). Large-scale vulnerability assessments for natural hazards. *Natural Hazards*, 47, 143-155.
- SOLÍN, Ľ. (2003). Susceptibility of basins to floods-regional typification of small basins of Slovakia from the point of view of soil permeability. *Conference Proceedings. XXIInd Conference of Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno (ČHMÚ) CD-ROM.
- SOLÍN, Ľ. (2005). Identification of homogenous regional classes for flood frequency analysis in the light of regional taxonomy. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 1105-1118.
- SOLÍN, Ľ. (2008). Analýza výskytu povodňových situácií na Slovensku v období 1996-2006. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56, 95-115.
- SOLÍN, Ľ., GREŠKOVÁ, A. (1999). Malé povodia Slovenska – základné priestorové jednotky pre jeho regionálne členenie. *Geografický časopis*, 51, 78-96.
- SOLÍN, Ľ., CEBECAUER, T., GREŠKOVÁ, A., ŠURI, M. (2000). *Small basins of Slovakia and their physical characteristics*. Bratislava (Institute of Geography SAS, Slovak Committee for Hydrology).
- Smernica ES/60/2007/. *Smernica Európskeho parlamentu a rady 2007/60/ES o ohodnotení a manažmente povodňových rizík*. Úradný vestník Európskej únie L 288/27.
- SMITH, K. (1996). *Environmental hazards*. London (Routledge).
- SMITH, K., WARD, R. (1998). *Floods. Physical processes and human impacts*. Chichester (Wiley).
- SULLIVAN, A., TERNAN, J. L., WILLIAMS, A. G. (2004). Land use change and hydrological response in the Camel catchment, Cornwall. *Applied Geography*, 24, 119-137.
- ŠÁLY, R., ŠURINA, B. (2000). *Pôdy Slovenska – mapa 1:500 000*. Bratislava (VÚPOP).
- TAPSELL, S. M., PENNING-ROUSELL, E. C., TUNDTALL, S. M., WILSON, T. L. (2002). Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360, 1511-1525.
- UN (1992). *Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management*. Geneva (United Nations Department of Humanitarian Affairs).
- VÁŠA, J., DRBAL, J. (1975). *Retence, pohyb a charakteristiky pŕdní vody*. Praha (VÚVH).
- WAEYMAN, D. R. (1970). Throughflow on hillslopes and its relation to the stream hydrograph. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 15, 25-33.
- WAGNER, K. (2007). Mental models of flash floods and landslides. *Risk Analysis*, 27, 671-682.

- WEINGARTNER, R., BARBEN, M., SPREAFICO, M. (2003). Floods in mountains areas – an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrology*, 282, 10-24.
- WERRITY, A. (2006). Sustainable flood management: oxymoron or new paradigm? *Area*, 38, 16-23.
- WHEATER, H. (2006). Flood hazard and management: a UK perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 2135-5145.
- WMO and GWP (2004). *Integrated flood management*. Concept paper. The Associated Programme on Flood Management. World Meteorological Organization, Global Water Partnership.
- Zákon č. 666/2004 Z. z. o ochrane pre povodňami z 27.10.2004.

Lubomír Solín

REGIONAL VARIABILITY OF FLOOD THREAT IN SMALL BASINS OF SLOVAKIA

The article is focused on identification of regional classification of flood threat in small basins based on the physical attributes of basins. The basic set of small basins contains 1,678 of small basins with areas oscillating between 5 and 150 km², located in mountain and hilly landscapes of Slovakia. After establishing the lower limit of a small basin's area, the assumption that a hydrologically important response requires a basin with area exceeding 5 km² (HMÚ 1965) was adopted. The upper limit of the small basin's size reflects the level of relief dissection of Slovakia's territory. Attributes characterizing the relief of basins (mean sea level altitude and the mean inclination of the basin), soil/substrate properties (soil texture index), the soil structure index and character of land cover (percentage of forestation) were the considered physical properties of the basin. The flood attributes of a basin are the number of flood events in the 1996-2006 period.

As far as methodology is concerned, delimitation of regional flood threat types consists of: 1) identification of physical attributes that decisively form the basic features of the runoff process and the associated flood event frequency (hydrological attributes of flood threat); 2) delimitation of physical flood threat classes based on combination of physical attributes of basins which were identified in the first step as important; 3) testing of differences in flood situation frequency between the delimited flood threat. Selection of physical attributes that are important in the light of spatial variability existing in basic features of the runoff process and flood event frequency was carried out either by the graphic method, which means comparison of arithmetic averages of flood event frequency representing individual classes of physical attributes. An approach based on logical principles (method of logical division) was applied to the delimitation of physical flood threat classes. Table 1 gives an example of the logical division classification scheme. The function of the delimited physical classes on individual hierarchic levels in relation to basic features of the runoff process and the associated flood event frequency is explanatory. This is the reason, why in terms of hydrological attributes of flood threat, distinct differences between classes of physical attributes are expected. The significance test of differences of flood situation frequency in flood threat classes was carried out by variance analysis. The delimited physical classes of flood threat gain the nature of regional classes only if regarding the frequency of flood situation they either comply with the criterion of inner homogeneity or outer heterogeneity.

The graphs on Fig. 3 show that of all the physical basin attributes, soil texture permeability is the one with decisive effects on spatial variability of basic flow features (value of base flow index -BFI). Differentiation of basic runoff process features is

closely connected with the spatial variability of flood event frequency. Change of flood event frequency depending on physical attributes of the basin is represented in Tables 2 to 5. The quoted analysis demonstrates that apart from soil texture permeability, the second physical basin attribute that affects spatial variability of flood event frequency is forestation. The effects of forestation on flood event frequency are even more conspicuous if assessed in the framework of soil texture permeability (Fig. 4).

Consequently, delimitation of flood threat classes was done by combination of soil texture permeability of a particular (attribute of the 1st hierarchic level) and forestation of the basin (attribute of the 2nd hierarchic level). Empirical data in the case of the two attributes show however, that not all inter-class differences in BFI and flood event frequencies are distinct; hence it was desirable to modify classes of physical attributes. By merging several classes into one, only two classes were created from the original seven classes of soil texture permeability. Class A (TPPT A) is the result of merging of original soil texture permeability classes 1 to 3 and the B (TPPT B) class contains the original classes 4 to 7. The number of forestation classes was also reduced. Two forestation classes were made from the original four. The first group consists of basins where forestation is less than 50% ($L < 50\%$) of the total basin area and the second group contains basins with forestation exceeding 50% of the total basin area ($L \geq 50\%$). By combination of 2 soil texture permeability classes with 2 forestation classes four physical flood threat classes were produced (Tab. 6.). Table 7 gives the effects of classes of the two factors on flood event frequency. Testing of the heterogeneity of flood threat classes in terms of flood event frequency revealed that the optimal solution is to delimit three flood threat classes (Tabs. 8 to 10). A classification of the small basins into identified flood threat classes is represented in Fig. 5.

Regional types of flood threat represent the premise for the approach to integrated management of their flood hazard.

Translated by H. Contrerasová