

Možnosti regionálnej typizácie kulminačných prietokov na území Slovenska

Katarína JENEIOVÁ

Analýza sezónnosti výskytu kulminačných prietokov je jednou z možností odhaľovania možných zmien hydrologického režimu. Článok sa zaoberá skúmaním možností regionálnej typizácie pre priestorové vyjadrenie sezónnej podobnosti časových radov kulminačných prietokov na území Slovenskej republiky. Vstupné údaje tvorilo 138 radov ročných kulminačných prietokov rovnomerne rozmiestnených na celom území Slovenska. Na regionálnu typizáciu bola použitá metóda k-means, optimálny počet zhlukov bol ustanovený pomocou metódy Siluety a testovalo sa viacero schém a typizačných premenných. Pri porovnaní výsledkov pri rôzne zvolených regionalizačných premenných sme pozorovali, že povodia v oblasti Vysokých Tatier sa zvyčajne vyskytujú v spoločnom zhluku, tak isto i povodia v oblasti Malých Karpát a Borskej nížiny a východného Slovenska.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: sezónnosť, k-means, regionálna typizácia

POOLING SCHEMES FOR FLOOD PEAKS IN SLOVAKIA Seasonality analysis is one of the options to detect the changes and shifts in the hydrological regime. The article is focused on the pooling methods for expressing the similarities in the seasonal regime of the flood peaks in Slovakia. The input data consisted of 138 time series of flood peak discharges. K-means method was used for regionalisation. The comparison of the results shows that the catchments in the areas of High Tatras tend to form one group. The next groups consist of the area of the Little Carpathians and Borska lowland and east Slovakia.

KEY WORDS: seasonality, k-means, pooling schemes

1 Úvod

Analýza sezónnosti výskytu extrémnych prietokov je jednou z možností odhaľovania možných zmien a ich príčin v povodňovom režime (Merz *et al.*, 2012). Sezónnosť výskytu povodní a zrážkových maxím v Alpsko-Karpatskom regióne bola doteraz analyzovaná vo viacerých štúdiách. Napríklad Merz *et al.* (1999) a Merz a Blöschl (2003) použili sezonalitu povodní ako indikátor opisujúci povodne a ich časový nástup. Beurtin a Thielen (2009) analyzovali mesačné frekvencie výskytu povodní v Nemecku a na základe tejto analýzy klasifikovali povodňový režim do troch kategórií. Parajka *et al.* (2009, 2010) použili index sezónnosti na identifikáciu hlavných klimatických a fyziografických činiteľov ovplyvňujúcich tvorbu povodní v Alpsko-Karpatskom regióne. Parajka *et al.* (2009, 2010) zhodnotili dôležitosť vlhkosti pôdy, výparu a snehovej pokrývky na tvorbu povodní. Hodnotenie predpokladaných zmien vo výskute kulminačných prietokov je možné vykonať i pomocou možností priestorového vyjadrenia a zovšeobecňovania, pričom sa skúma možnosť existencie globálnych priestorových zákonitostí, napr. Parajka *et al.* (2010) použili metódu k-means na identifikovanie oblastí s podobným režimom zrážok a povodní.

Článok sa zaoberá skúmaním možností regionálnej typizácie na priestorové vyjadrenie sezónnej podobnosti časových radov kulminačných prietokov na území Slovenskej republiky.

2 Metódy

Na analýzu sezónnosti sa vo svete najčastejšie používa smerová štatistika (napr. Bayliss a Jones, 1993; Magilligan and Graber, 1996; Burn, 1996; Burn, 1997). Ako miera podobnosti hydrologickej odozvy povodí sa používa časový nástup a pravidelnosť výskytu extrémov za predpokladu, že sezónnosť je zapríčinená podobnosťou fyzicko-geografických a meteorologických vplyvov. Jedným z prístupov k jej výpočtu je podľa Burna (1996, 1997), ktorý používa dva parametre: priemerný dátum výskytu povodňových udalostí θ a parameter r , ktorý označuje index sezónnej koncentrácie prietokov (variabilitu výskytu). Hodnota θ , určená v radiánoch od 0 do 2π , charakterizuje myslené ťažisko výskytov prietokov počas roku. Je to bezrozmerné číslo, ktoré sa môže pohybovať od nuly po jedna (ak $r = 1$ – prietoky sa vyskytli v ten istý deň roka, ak $r = 0$ - skúmané prietoky sú rozložené rovnomerne počas celého roka).

Hodnota θ je určená vzťahom, ako uhol jednotkovej kružnice:

$$\theta = \frac{D_j \cdot 2\pi}{365}, \quad (1)$$

D_j je dátum výskytu prietokov transformovaný na Juliánsky dátum.

Súradnice x_θ a y_θ pre n dní j sú vyjadrené ako:

$$x_\theta = \frac{1}{n} \sum_j \cos(\theta_j), \quad (2)$$

$$y_\theta = \frac{1}{n} \sum_j \sin(\theta_j). \quad (3)$$

Priemerný uhol je potom určený pre 1. a 4. kvadrant, $x > 0$:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right), \quad (4)$$

pre 2. a 3. kvadrant, $x < 0$:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) + \pi. \quad (5)$$

Priemerný deň výskytu je určený spätným transformovaním uhla na dátum:

$$D = \theta \cdot \frac{365}{2\pi}. \quad (6)$$

Pomocou Pytagorovej vety vieme nakoniec určiť index sezónnej koncentrácie r :

$$r = \sqrt{x_\theta^2 + y_\theta^2}. \quad (7)$$

Hodnotenie predpokladaných zmien je možné vykonať i pomocou možností priestorového vyjadrenia a zovšeobecňovania, keďže analýzou v jednotlivých staniách je len ťažko možné posúdiť, či existujú globálne priestorové zákonitosti v zmenách skúmaných charakteristík. Metóda k-means zhlukovania je jednoduchou nehierarchickou metódou založenou na princípe iterácie, kde je prvok postupne priradovaný k tomu zhluku, ku ktorého centru je najbližšie. Počet zhlukov je nutné určiť vopred (MacQueen, 1967). Táto metóda je taktiež jednou z častých spôsobov určovania regiónov pri tomto type úloh.

Regióny by nemali byť závislé iba od jednej charakteristiky povodia, keďže výsledky regionalizácie sú v týchto prípadoch nedostačujúce (Pfaundler, 2001). Z-score štandardizácia (X_z) je používaná na zmenšenie vplyvu rozdielnych veľkostí premenných. Je založená na princípe identifikácie rozdielu medzi hodnotou X a priemernou hodnotou dátového súboru \bar{X} . Následne sa hodnoty roztriedujú do skupín na základe smerodajných odchýlok SD_x hodnôt X (Larose, 2005):

$$X_z = \frac{x - \bar{x}}{SD_x} \quad (8)$$

Na determináciu výsledného počtu zhlukov sa používa napr. metóda Siluety (Rousseeuw, 1987). Hodnota Siluety pre každú typizačnú premennú (S_i) v zhluku je mierou jej podobnosti v rámci zhluku v porovnaní s ostatnými zhlukmi:

$$S_i = \frac{(b_i - a_i)}{\max\{a_i, b_i\}} \quad (9)$$

a_i je priemerná vzdialenosť i -teho bodu od ostatných bodoch v zhluku, b_i je priemerná vzdialenosť od i -teho bodu k bodu v inom zhluku. Priemerná šírka Siluety sa vypočíta ako priemer všetkých hodnôt Siluety v zhluku. Hodnota Siluety sa pohybuje od 0 po 1, pričom hodnota 1 značí, že bola nájdená silná štruktúra a pri hodnotách blížiacich sa k nule nebola nájdená podstatná štruktúra. Na odhad počtu zhlukov bola použitá metóda koeficientu Siluety podľa Pele *et al.* (2012) a Henning (2014), s Euklidovskou mierou vzdialenosti.

3 Vstupné údaje

Vstupné údaje tvorili rady ročných kulminačných prietokov. Bolo vybraných 138 vodomerných staníc (Tab. 1.) s neprerušenu dĺžkou pozorovaní v hydrologických rokoch 1971 až 2010 (Slovenský hydrometeorologický ústav). Dátumy výskytu kulminačných prietokov boli porovnané, či sa nevyskytli v rámci dĺžky 7 dní na prelome hydrologických rokov a dva vrcholy jednej povodňovej vlny neboli súčasťou dvoch hydrologických rokov. Výsledky potvrdili, že kulminačné prietoky v jednotlivých hydrologických rokoch neboli v rámci tých istých povodňových vln kalendárneho roka. Rady údajov boli teda považované za nezávislé.

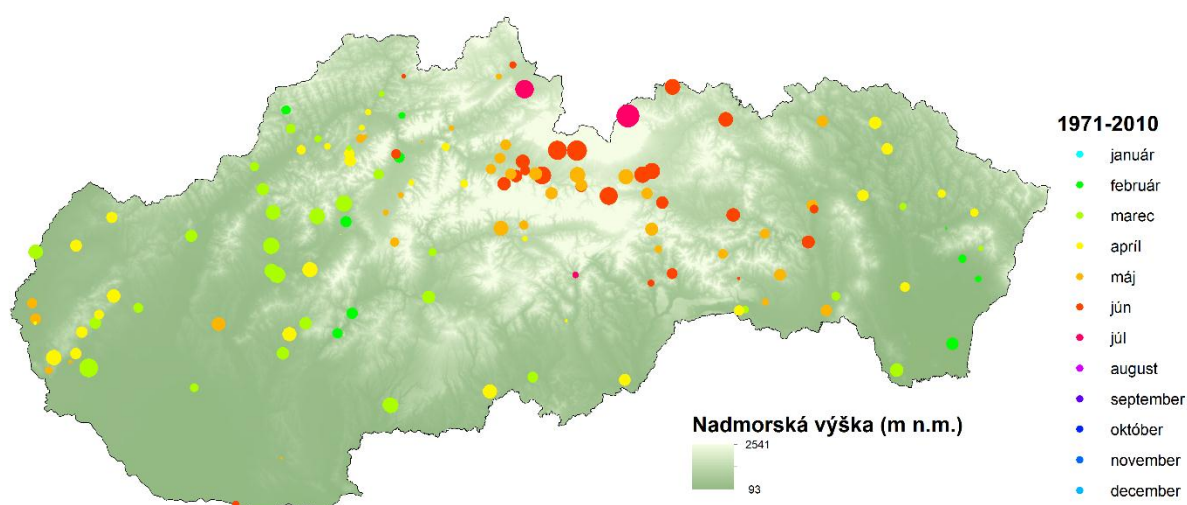
Tabuľka 1: Popis povodí (Priem. plocha – priemerná veľkosť povodia, Max plocha – maximálna veľkosť povodia, Min plocha – minimálna plocha povodia, Priem. výška stanice – priemerná nadmorská výška vodomernej stanice, Priemer priem. výška na povodie – priemerná nadmorská výška na povodie, Min priem. výška – minimálna priemerná nadmorská výška na povodie, Max priem. výška – maximálna priemerná nadmorská výška na povodie)

Povodie	Počet staníc	Priem. plocha (km ²)	Max plocha (km ²)	Min plocha (km ²)	Priem. výška stanice (m n.m.)	Priemer priem. výška na povodie (m n.m.)	Min priem. výška (m n.m.)	Max priem. výška (m n.m.)
Bodrog	15	1375,5	11474,3	19,4	173	427	90	1143
Bodva	5	215,9	662,8	34,5	213	534	170	1232
Dunaj	11	15642,6	171624,1	7,3	196	302	105	759
Hornád	11	913,4	4232,2	68,2	376	725	173	1945
Hron	8	827,9	3821,4	47,1	346	754	129	2031
Ipeľ	4	369,6	685,7	214,3	155	432	142	1112
Morava	6	4177,3	24129,3	31,1	170	289	141	812
Nitra	13	257,6	1134,3	35,6	230	468	144	1336
Poprad	7	267,2	1262,4	34,9	655	1036	450	2639
Slaná	6	135,3	270,2	57,4	309	648	160	1477
Váh	52	370,2	11217,6	2,9	510	869	109	2458

4 Výsledky

Analýza sezónnosti výskytu kulminačných prietokov

Na obrázku č. 1 sú znázornené výsledky analýzy charakteristík smerovej štatistiky: priemerný dátum výskytu kulminačných prietokov a index sezónnej koncentrácie. Kulminačné prietoky sa vyskytujú prevažne v mesiacoch máj, jún a júl v oblasti severného Slovenska – Vysoké a Nízke Tatry a juhovýchodného Slovenska. Májové kulminačné prietoky sú lokalizované prevažne na západnom Slovensku na Borskej nížine. V ostatných častiach Slovenska prevládajú kulminačné prietoky v období mesiacov február, marec a apríl. Najvyššie zastúpenie vysokých hodnôt (viac ako 0,5 – silná sezónnosť) indexu sezónnej koncentrácie na povodiach sa nachádza v oblasti Vysokých Tatier.



Obrázok 1: Výsledky analýzy sezónnosti pre obdobie 1971-2010 (Legenda: Priemerný dátum výskytu maximálnych ročných prietokov je označený farebne. Veľkosť bodu znázorňuje silu indexu sezónnej koncentrácie r).

Tvorba regionálnych typov použitím charakteristík sezónnosti

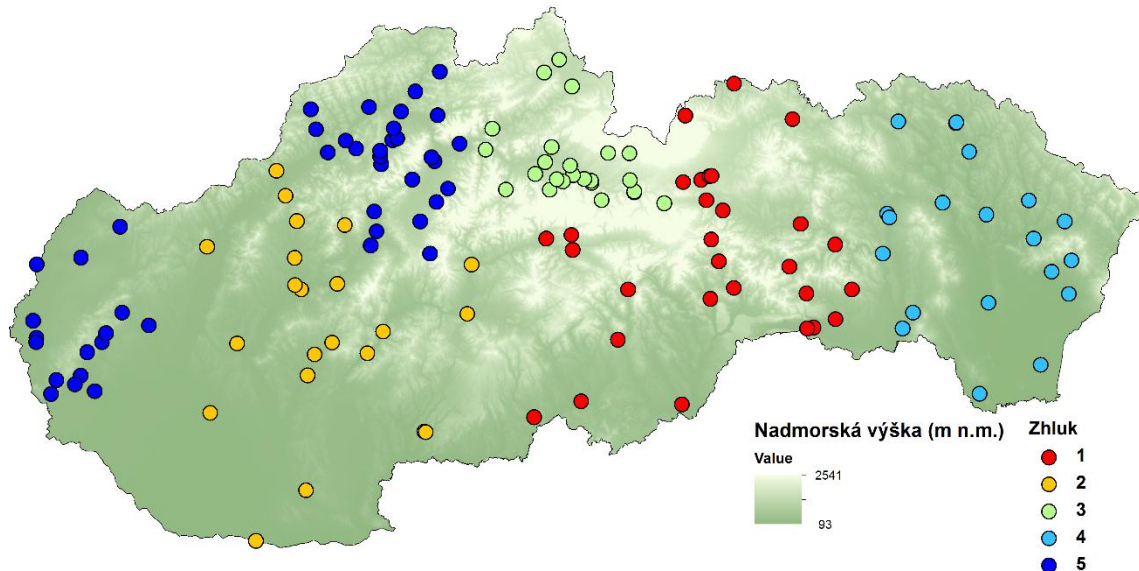
Ako typizačné premenné sa použili odvodené charakteristiky sezónnosti a to: priemerný dátum výskytu kulminačných prietokov a index sezónnej koncentrácie. Priemerný dátum výskytu θ bol spätne transformovaný na karteziánske súradnice, pretože bez ich transformácie by k-means zhlukovanie nebolo vhodným pre riešenie regionalizácie (Robinson, 2015). Z-score štandardizácia bola použitá na normalizovanie veľkosti a škálovania premenných. Priemerné hodnoty Siluety pre rôzne počty regionálnych typov sú uvedené v Tab. 2. Najvyššia hodnota Siluety 0,523 bola dosiahnutá pre päť regionálnych typov a naznačuje primeranú silu štruktúry zhlukov.

Tabuľka 2: Priemerná Silueta pre odhad počtu zhlukov (Legenda: **bold** - výsledný počet regionálnych typov)

Počet zhlukov	Priemerná hodnota Siluety	Počet zhlukov	Priemerná hodnota Siluety	Počet zhlukov	Priemerná hodnota Siluety
2	0,412	6	0,496	10	0,481
3	0,488	7	0,494	11	0,475

4	0,489	8	0,486	12	0,476
5	0,523	9	0,481	13	0,476

Výsledok k-means zhlukovania pre počet zhlukov päť sa nachádza na Obr.2. Do skupiny povodí v regionálnom type 1 patria povodia na strednom Slovensku; regionálny typ 2 zahŕňa povodia dolného Váhu a Hrona; regionálny typ 3 je lokalizovaný na severe Slovenska; regionálny typ 4 na východe; regionálny typ 5 na západe a severe Slovenska je rozdelený na dve oblasti výskytu (Borská nížina a oblasť Malej a Veľkej Fatry) regionálnym typom 2.



Obrázok 2: Priestorové rozloženie 5 regionálnych typov identifikovaných pomocou indexov sezónnosti výskytu kulminačných prietokov v období pozorovania 1971-2010.

Tvorba regionálnych typov kombináciou fyzicko-geografických charakteristík a charakteristík sezónnosti

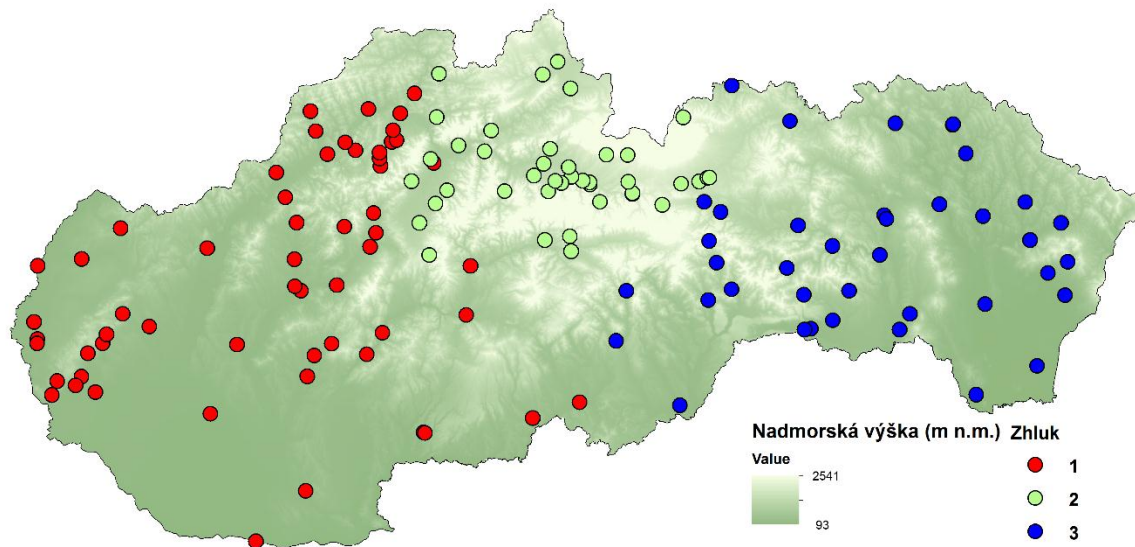
Analýza sezónnosti bola použitá na identifikovanie regiónov s podobnými vlastnosťami povodňových režimov, ktoré boli v nasledujúcom kroku spojené s poznatkami o procesoch potrebných k tvorbe odtoku a fyzicko-geografickými premennými.

V prvom kroku boli zvolené ako typizačné premenné: geografické súradnice x a y , priemerný dátum výskytu kulminačných prietokov a index sezónnej koncentrácie. Uvažovaná bola aj priemerná nadmorská výška povodia a plocha povodia. Po vyhodnotení všetkých premenných pomocou Pearsonovej korelačnej matice boli parametre priemerná nadmorská výška na povodie a plocha povodia vylúčené z analýzy pre vysokú (0,55) vzájomnú koreláciu s ostatnými parametrami. Typizačným parametrom boli priradené váhy zodpovedajúce dôležitosti premenných pri hodnotení podobných režimov podľa štúdie Parajku *et al.* (2010). Z-score štandardizácia bola použitá na normalizovanie veľkosti a škálovania premenných pred zhlukovaním. Na odhad počtu zhlukov bola použitá metóda koeficientu Siluety (Rousseeuw, 1987) a ako miera vzdialenosti bola použitá Euklidovská vzdialenosť. Najvyššia hodnota Siluety 0,368 bola dosiahnutá pre dva zhluky čo naznačuje slabú štruktúru vzájomných vzťahov prvkov v zhlukoch.

V druhom kroku boli použité i alternatívne metódy určenia počtu zhlukov (Kalinského kritérium, Bayesovo informačné kritérium pre parametrizované Gausove zmiešané modely), avšak uvažovanými typizačnými premennými boli určené vždy 2 regionálne typy i po zmene váhy typizačných premenných.

V treťom kroku boli rovnaké typizačné premenné (geografické súradnice x a y , priemerný dátum výskytu kulminačných prietokov transformovaný na polárne súradnice a index sezónnej koncentrácie) použité bez priradenia váhy. Postup výpočtu bol v ostatných bodoch zhodný s predchádzajúcim. Najvyššia hodnota Siluety 0,225 bola dosiahnutá pre sedem zhlukov.

V poslednom kroku boli ako typizačné premenné boli zvolené: priemerný dátum výskytu Θ spätne transformovaný na karteziánske súradnice a charakteristiky povodia - veľkosť povodia a priemerná nadmorská výška na povodie, ktoré neboli v teste Pearsonovou maticou vzájomne korelované s ostatnými premennými. Siluetou (0,389) určený počet zhlukov bol tri (Obr.3). Regionálny typ 1 sa nachádza na západnom Slovensku; regionálny typ 2 v oblasti Vysokých a Nizkých Tatier a regionálny typ 3 na východnom Slovensku.



Obrázok 3: Priestorové rozloženie 3 regionálnych typov s podobnou sezónnosťou výskytu kulminačných prietokov v období pozorovania 1971-2010 – kombinácia regionalizačných premenných.

5 Diskusia a záver

V práci boli realizované a porovnané alternatívy tvorby regionálnych typov. Ako typizačné premenné boli zvolené charakteristiky sezónnosti a fyzicko-geografické charakteristiky povodií. Štúdia Koplina *et al.* (2014), ktorá pre zabránenie nevhodnej interpretácie krátkych indexov sezónnej koncentrácie analyzuje sezónnu distribúciu spolu s procesmi tvorby odtoku, vyzdvihuje dôležitosť a neoddeliteľnosť analýzy procesov tvorby povodní pri analýze ich sezónneho výskytu. Analýza sezónnosti výskytu kulminačných prietokov je teda možným nástrojom na skúmanie časového nástupu a výskytu extrémov za predpokladu súčasnej štúdie a pochopenia procesov pri tvorbe a vzniku povodňových prietokov. Čo potvrdzuje i štúdia Alpsko – Karpatského oblúka Parajkom *et al.* (2010), ktorý analýzu sezónnosti výskytu a procesov tvorby odtoku použili ako podklad pre tvorbu regionálnych typov.

Pre tvorbu regionálnych typov bola zvolená metóda nehierarchického zhlukovania k-means. V tejto metóde bolo potrebné určiť počet zhlukov vopred, preto bol na výpočet ideálneho počtu zhlukov použitý koeficient Siluety. Tento postup je len jeden z množstva dostupných zhlukovacích metód a metód na určenie počtu zhlukov. Existuje i množstvo možností určenia typizačných premenných, ich váh a kombinácií, ktoré pri každom rozdelení i pri použitej rovnakej metóde zhlukovania a výbere počtu zhlukov, vždy dosiahnu iné výsledné rozdelenie skúmaných povodií. A teda je nutné skúmanie procesov a príčin vzniku detekovaných zmien. Parajka *et al.* (2010) vo svojej štúdií použil referenčné obdobie 1961-2000 a ďalšie typizačné premenné - sezónnosť zrážkových úhrnov a priradenie váhy jednotlivým typizačným premenným. Kombináciou sezónností dvoch hydrologických veličín dosiahol presnejší popis zrážkovo-odtokových pomerov a rozdelenie územia Slovenska na zóny ako bolo dosiahnuté v tomto článku len s použitím fyzicko-geografických a povodňových typizačných premenných. Na území Slovenska sa v jeho štúdií nachádzali 3 regionálne typy: Zhuk 4 –nížiny,

zrážky v júli až auguste, zrážky spôsobujúce povodne pod vplyvom západných prúdení, povodne december až február, mokré pôdy v zime hlavne z dôvodu snehu a zmrznutej pôdy, typické povodne z dažďov na snehu. Povodne sa môžu vyskytovať počas celého roka. Zhluk 2 – Stredné Slovensko, zrážky v júli až auguste, povodne v máji až júni, topenie snehu nastáva v skoršom období a spôsobuje májové povodne, extrémne povodne sa vyskytujú až do októbra hlavne na strednom Slovensku. Zhluk 8 – nížiny a pahorkatiny, zrážky v júli až auguste, silná sezónnosť extrémnych zrážok v letnom období, povodne v marci až máji, malé povodne v marci v dôsledku topenia snehu, veľké povodne v júni a júli z extrémnych zrážok. V tomto príspevku sú najviac podobné tejto analýze výsledky regionálnej typizácie s použitím typizačných premenných indexov sezónnosť, priemernou nadmorskou výškou na povodie, ktorá čiastočne nahrádza vplyv rozloženia zrážok a plochou povodia, v ktorej boli určené tiež tri zhluky na území Slovenska.

Pri porovnaní výsledkov jednotlivých regionálnych typizácií pozorujeme, že povodia v oblasti Vysokých Tatier sa zvyknú vyskytovať v spoločnom zhluku, ďalej oblasť Malých Karpát a Borskej nížiny a východné Slovensko.

6 Referencie

- BAYLISS, A. C., JONES, R. C. *Peaks-over-threshold flood database: Summary statistics and seasonality*. IH Report No. 121, 1993.
- BEURTON, S., THIEKEN A.H. Seasonality of floods in Germany, *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54:1, 62-76, DOI: 10.1623/hysj.54.1.62.
- BURN D.H. The use of seasonality measures in hydrology. In: Brunelle, P.E., Editor. *Proceedings, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Montreal, Quebec. 1, 264–273. 1996.
- BURN, D.H. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *J. Hydrol.*, 1997. 202, 212-230.
- HENNING, C. *fpc: Flexible procedures for clustering*. R package 2.1-9 <http://cran.r-project.org/web/packages/fpc/index.html>. 2014.
- KOPLIN, N., SCHADLER, B., VIVIROLI, D., WEINGARTNER, R. Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change, *Hydrological Processes*, 2014, 28, 2567-2578.
- LAROSE, D. *Discovering knowledge in data: An introduction to data mining*. John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- MACQUEEN, J. B. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability I*. University of California Press. pp. 281–297, 1967.
- MAGILLIGAN, F. J., GRABER, B. E. Hydroclimatological and geomorphic controls on the timing and spatial variability of floods in New England, USA, *Journal of Hydrology*, 1996, 178, 1, 159–180.
- MERZ, B., VOROGUSHYN, S., UHLEMANN, S., DELGADO, J., HUNDECHA, Y. HESS Opinions: "More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series", 2012, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (5), pp. 1379-1387.
- MERZ, R., BLÖSCHL, G. A process typology of regional floods, *Water Resources Research*, 2003, 49, 12, SWC51-SWC520.
- MERZ, R., PIOCK-ELLENA, U., BLÖSCHL, G., GUTKNECHT, D. *Seasonality of flood processes in Austria*, IAHS-AISH Publication, 1999, 255, 273-278.
- PARAJKA, J., KOHNOVÁ S., BÁLINT, G., BARBUC, M., BORGA, M., CLAPS, P., CHEVAL, S., DUMITRESCU, A., GAUME, E., HLAVČOVÁ, K., MERZ, R., PFAUNDLER, M., STANCALIE, G., SZOLGAY, J., BLÖSCHL, G. Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine–Carpathian range. *Journal of Hydrology*. 2010, roč. 394, s. 78–89.
- PARAJKA, J., KOHNOVA, S., MERZ, R., SZOLGAY, J., HLAVCOVA, K., BLÖSCHL, G. Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria, *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54, 3, 456-473.

PELE, J., BECU, J.M., ABDI, H., CHABBERT, M. 2012 *bios2mds: From BIOlogical Sequences to MultiDimensional Scaling*, R package 1.2.2. <http://cran.r-project.org/web/packages/bios2mds/index.html>.

PFAUNDLER, M., STANCALIE, G., SZOLGAY, J., BLÖSCHL, G. Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine–Carpathian range. *Journal of Hydrology*. 2010, roč. 394, s. 78–89.

ROUSSEEUW, P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20, 53-65.1987.

Summary

Seasonality analysis is one of the options to detect the changes and shifts in the hydrological regime. The article is focused on the pooling methods for use to express the similarities in the seasonal regime of the flood peaks in Slovakia. The input data consisted of 138 time series of flood peak discharges. K-means method was used for regionalisation, the Silhouette method was used to determine the number of clusters. In the first step only the seasonal characteristics were used for pooling. In this method 5 regional groups were found. In the next step a combination of seasonal and geographical characteristics (geographical coordinates, mean catchment elevation, catchment area) were used. The comparison of the results shows that the catchments in the areas of High Tatras tend to form one group. The next groups consist of the area of the Little Carpathians and Borska lowland and east Slovakia.

Ing. Katarína Jeneiová, Phd.

Slovenský hydrometeorologický ústav

Jeséniova 17

833 15 Bratislava

E-mail: katarina.jeneiova@shmu.sk