

# Hydrologický cyklus v horskom prostredí

*Holko, L., Kostka, Z., Danko, M., Liová, S.: Hydrological Cycle in Mountain Environment. Životné prostredie, 2011, 45, 2, p. 59 – 63.*

Hydrological cycle in the mountains has some typical features. Due to less data from the harsh mountain environment they are not studied into such a detail as those in lower elevated, more populated areas. The article presents an overview of the results of hydrological research conducted in the Jalovecký creek catchment, which is representative for the small mountain catchments of the highest part of the Carpathian Mountains. Second part of the article is focused on the main water balance components (precipitation, runoff) in period 1989 – 2010 including extremes.

**Key words:** mountain catchments, hydrological balance, runoff formation, catchment retention, precipitation gradient

Hydrologický cyklus v horskom prostredí má niektoré špecifické vlastnosti. Rozdelenie základných klimatických prvkov (atmosférických zrážok a teploty vzduchu) aj vegetácie je výrazne ovplyvnené veľkými výškovými rozdielmi. Prejavuje sa aj vplyv zložitej morfológie, napr. náveterného a záveterného efektu pri zrážkach, premiestňovanie snehu z hrebeňov na úpätia svahov a do dolín, vplyv konfigurácie okolitého terénu na energetickú bilanciu atď. Horské povodia sú často zalesnené, majú vyššiu priemernú nadmorskú výšku a sklon, plytšie pôdy a menej rozsiahle brehové oblasti. Menšie zvodnené vrstvy s pórovitým prúdením sa obyčajne nachádzajú len v okolí väčších tokov. Prúdenie podzemnej vody je často puklinové, niekedy krasové. Zóny zvetrávania však môžu dosahovať aj desiatky metrov a mnohé povodia v horskom prostredí sú ovplyvnené činnosťou existujúcich alebo roztopených ľadovcov.

Vzhľadom na extrémne prírodné podmienky je horské prostredie menej osídlené, a preto aj menej pokryté štandardnými aj experimentálnymi meraniami. Výsledkom je menej poznatkov o hydrologickom cykle v tomto prostredí, najmä vo veľmi rozsiahlych alebo vysokých pohoriach. Horské oblasti však významne ovplyvňujú hydrologický režim v nižšie položených, často husto zaľudnených oblastiach. Takmer všetky svetové veľtoky a mnoho menších riek má svoj pôvod v horách (Bandyopadhyay et al., 1997). Vyššie zrážky a topenie snehu v horskom prostredí ovplyvňujú hydrologické pomery a ľudskú spoločnosť aj ďaleko od nich. Topenie snehu a ľadovcov v horách je v mnohých oblastiach

sveta jediným zdrojom vody pre riečnu sieť a dopĺňanie podzemnej vody mimo hôr v suchých obdobiach (napr. veľké časti Ázie, západu severnej a južnej Ameriky).

Takmer 60 % územia Slovenska má nadmorskú výšku nad 300 m n. m., oblasti nad 900 m n. m. zaberajú vyše 8 % plochy. Aj keď nižšie položené oblasti nie sú v našich klimatických podmienkach až tak veľmi závislé od topenia snehu v horskom prostredí, hory majú veľký vplyv na množstvo a režim odtoku. Napriek dobrému pokrytiu územia Slovenska štandardnou meteorologickou a hydrometeorologickou sieťou, pri výpočte hydrologickej bilancie malých horských povodií vznikajú problémy súvisiace s tým, že táto sieť nedostatočne pokrýva najvyššie časti územia (Holko a kol., 2001).

Najdlhšie systematické merania zamerané na lepšie poznanie hydrologického cyklu v horskom prostredí sa na Slovensku vykonávajú v povodí Jaloveckého potoka v Západných Tatrách (Holko, Kostka, 2006).

## Hydrologický výskum v povodí Jaloveckého potoka

Povodie Jaloveckého potoka je najzápadnejším povodím Západných Tatier. Jeho plocha je 22,2 km<sup>2</sup>, priemerná nadmorská výška 1 500 m (820 – 2 178 m). Povodie má južnú orientáciu a priemerný sklon svahov je 30°. Kryštalinikum (kryštalické bridlice, pararuly, migmatity) tvorí 48 % povodia, granodiority 21 %, mezozoikum (v západnej časti povodia) 7 % a kvartér (najmä glaciofluviálne a svahové sedimenty) 21 % povodia. Kambisol, podzol a litosol predstavujú hlavné pôdne typy, na mezozoickom



Obr. 1. Morfológický a vegetačný kontrast medzi podhorskou časťou povodia celého Jaloveckého potoka v Liptovskej kotline a horskou časťou, na ktorú sa zameriava hydrologický výskum; pohľad z Chopka. Foto: Ladislav Holko

podklade sa vyskytujú aj rendziny. Pôdy sú väčšinou plytké a majú vysoký obsah skeletu (40 – 50 % a viac). Lesy (dominantný je smrek), kosodrevina a pásma alpských lúk a skál pokrývajú 44, 31 a 25 % plochy povodia.

Prvé hydrologické merania v povodí sa uskutočnili v roku 1986. Odtok z povodia meria limnigraf v nadmorskej výške 820 m od leta 1987. Kontinuálne merania teploty vzduchu a týždenné merania zrážok sa vykonávajú v priemernej nadmorskej výške povodia (1 500 m) a neďaleko záverečného profilu povodia (750 m) od roku 1987. Podrobnejšie meteorologické merania pomocou automatických staníc sa vykonávajú v nadmorskej výške 1 500 a 1 900 m. Sieť šiestich totalizátorov v nadmorských výškach 750 – 1 775 m poskytovala mesačné úhrny zrážok v období 1988 – 2008. V súčasnosti pokračujú merania štyroch totalizátorov v nadmorských výškach 750 – 1 900 m. V zimnom a jarnom období sa v povodí uskutočňujú merania výšky a vodnej hodnoty snehu. Niekoľko sezón boli vykonávané priestorové a časové merania vlhkosti pôdy. Chemizmus vody bol meraný len výnimočne, ale už od roku 1990 je realizovaný monitoring stabilných izotopov vody v zrážkach, odtoku, snehovej pokrývke, pôdnej a podzemnej vode a od roku 2005 prebieha pravidelné meranie vodivosti vody vo vybraných tokoch a prameňoch.

Spracovanie meraných údajov a ich porovnanie s údajmi z celého povodia Jaloveckého potoka, ktoré zahŕňa aj podhorskú časť v Liptovskej kotline v nadmorskej výške 565 – 820 m (obr. 1), poukázalo na výrazné rozdiely v ročných úhrnoch zrážok medzi horami a kotlinou, pričom v samotných horách sú rozdiely medzi jednotlivými lokalitami relatívne menšie. Podobný záver platí aj pre vývoj snehovej pokrývky. Niektoré zimy, ktoré sú v kotline snehovo veľmi slabé, môžu byť v horách od určitej nadmorskej výšky normálne alebo nadpriemerné (napr. zima 2008/2009).

Odtok z povodia reaguje na zrážky rýchlo, v priemere do dvoch hodín. V podhorskej časti povodia je rast odtoku po zrážkach o niečo miernejší ako v horách. Najvýznamnejším faktorom ovplyvňujúcim reakciu odtoku na zrážky je celkový úhrn zrážok. Významný vplyv iných faktorov, ako je napr. predchádzajúca vlhkosť povodia, sme v povodí Jaloveckého potoka nezistili. Na rozdiel od stále rozšírenej predstavy však často väčšina vody, ktorá odtieká z povodia pri vlnách zo zrážok alebo z topenia snehu nepochádza priamo zo zrážok, ktoré ich vyvolali (tzv. príčné zrážky), ale je tvorená vodou, ktorá bola v povodí prítomná ešte predtým,

a ktorá je vytláčaná do riečnej siete vodou z príčných zrážok alebo topenia snehu. Zaujímavým javom, ktorý sa vyskytuje počas topenia snehu pri tzv. radiačnom type počasia (slnečné teplé dni bez zrážok a studené noci), je pravidelné denné kolísanie odtoku. Tento jav je známy z oblastí s topiacimi sa ľadovcami. Minimálne prietoky počas takýchto dní sa v povodí Jaloveckého potoka vyskytujú doobeda, maximálne večer (obr. 2).

Merania vodivosti vody a prietokov pozdĺž riečnej siete ukázali typické postupné zvyšovanie prietokov smerom k ústiu povodia bez výrazných prítokov podzemnej vody. Aj keď sú svahy v povodí veľmi strmé, povrchový odtok sa v ňom vyskytuje (opäť na rozdiel od všeobecnej predstavy) iba zriedkavo. Len niekoľko percent zrážkových udalostí má dostatočne vysokú intenzitu na to, aby spôsobili vznik povrchového odtoku. Povrchový odtok počas vln vzniká len v malej časti povodia, ktorá obyčajne neprekročí 20 % plochy povodia (Holko et al., 2011). Okrem množstva a časového rozdelenia zrážok a vlastností pôdy, ktorá má pri tvorbe odtoku kľúčový význam, na tvorbu odtoku z povodia vplyva aj vegetácia prostredníctvom intercepcie a vplyvu na vlastnosti pôdneho profilu. Merania poukázali na veľmi veľkú variabilitu intercepcie smrekového porastu. V dlhodobom priemere bolo v lese na rôznych miestach nameraných o 28 – 65 % menej zrážok ako na neďalekej voľnej ploche. Množstvo dažďa zachyteného vegetáciou je variabilné. Pre rôzne veľké úhrny zrážok kolíše od 9 do 100 % a niekedy bolo v lese nameraných aj viac zrážok ako na voľnej ploche. Merania vlhkosti pôdy však ukázali, že povrchová vrstva pôdy bola v lese vždy suchšia ako mimo lesa.

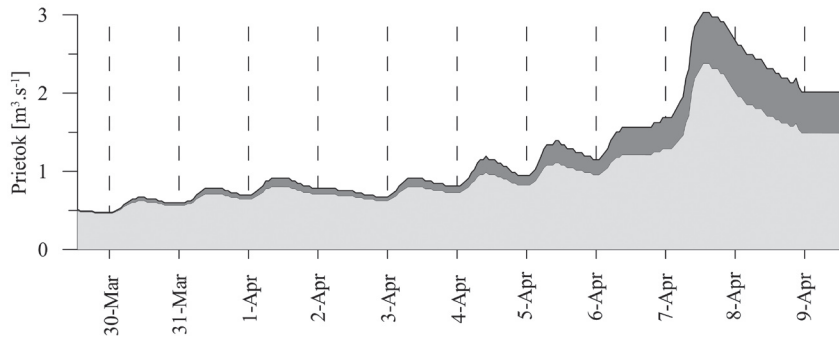
Vyhodnotenie meraní izotopického zloženia vody ukázalo, že voda, ktorú prinášajú do povodia zrážky, sa v ňom zdrží v priemere 20 mesiacov. Na porovnanie, v povodí horného Váhu po Liptovský Mikuláš sa voda

zdrží v priemere len 16 mesiacov. Naznačuje to, že na dotovanie odtoku sa v povodí Jaloveckého potoka za bežných podmienok (bez extrémneho sucha) zúčastňuje väčšia časť povodia, kým v povodí horného Váhu sa najviac zapájajú oblasti ležiace bližšie k rieke. Vzorky vody odobrané počas nízkych prietokov ukázali, že voda s dlhším obehom sa v povodí Jaloveckého potoka zdrží v priemere 26 mesiacov a v povodí horného Váhu v priemere 30 mesiacov. To potvrdzuje, že malé povodie Jaloveckého potoka akumuluje menej vody ako veľké povodie Váhu. Počas suchého obdobia sme však datovaním veku vody pomocou chlórofluorokarbónov zistili v tokoch aj vodu, ktorá infiltrovala pred vyše 20 rokmi. Podrobnejší prehľad meraní, základných výsledkov a niektorých publikácií venovaných povodiu Jaloveckého potoka uvádzajú Holko a Kostka (2006, 2010).

### Základné prvky hydrologickej bilancie v povodí Jaloveckého potoka v období 1989 – 2010

Údaje o základných prvkoch hydrologickej bilancie (ročné zrážky a odtoky) v povodí Jaloveckého potoka počas hydrologických rokov 1989 – 2010 uvádza tab. 1. Na porovnanie prikladáme aj údaje pre celé povodie Jaloveckého potoka vrátane podhorskej časti. Priemerný ročný úhrn zrážok v horách za obdobie 1989 – 2010 bol 1 601 mm, v celom povodí 1 019 mm. Priemerný odtok z hôr bol 1 186 mm, z celého povodia 754 mm. V priemere teda odteká z hôr aj z celého povodia približne 63 – 64 % spadnutých ročných zrážok. Tieto hodnoty sa samozrejme v rôznych rokoch menia. Priemerné hodnoty ročných zrážok

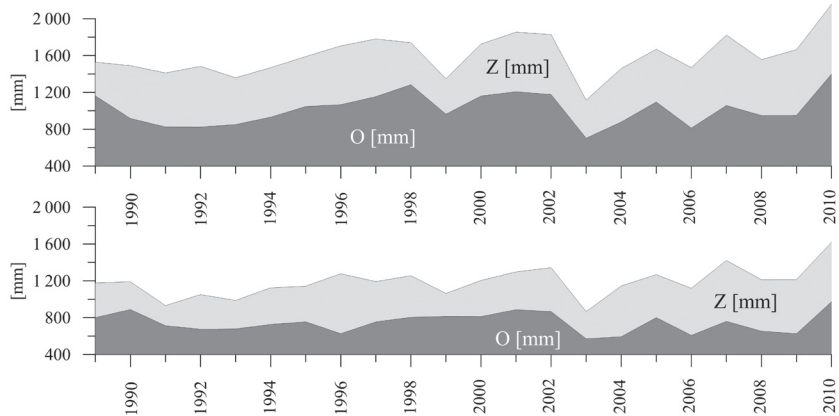
a odtoku boli výrazne ovplyvnené (zvýšené) extrémne vlhkým rokom 2010. Obr. 3 ukazuje, že v 90. rokoch 20. storočia boli ročné zrážky a odtok pomerne vyrovnané. Od roku 1999 bola zaznamenaná väčšia variabilita ročných zrážok aj odtoku.



Obr. 2. Denná variabilita prietoku v povodí Jaloveckého potoka počas topenia snehu pri radiacnom type počasia na začiatku apríla 1999.

Poznámka: prerušované čiary naznačujú poludnie v jednotlivých dňoch; tmavšia časť hydrogramu predstavuje príspevok vody z topiaceho sa snehu k celkovému odtoku určený pomocou analýzy izotopického zloženia vzoriek vody

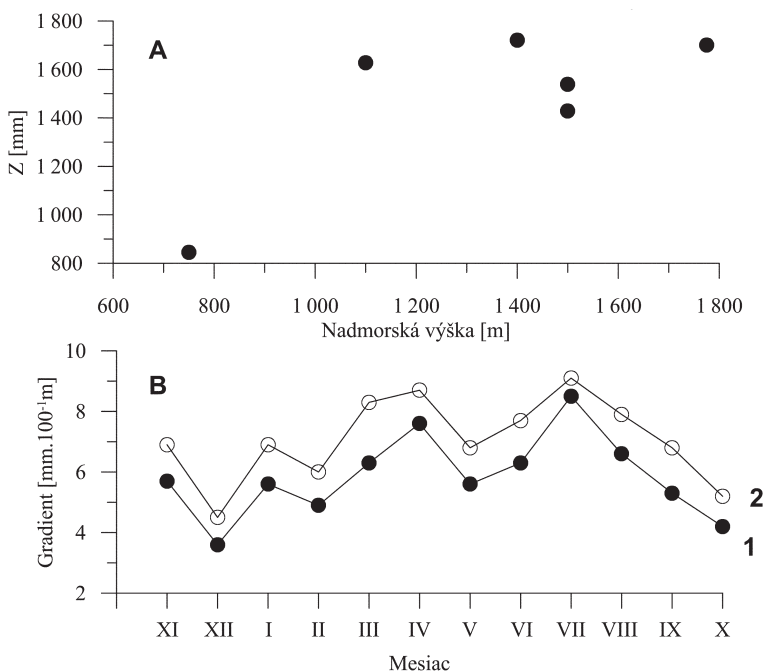
Obr. 3. Ročné zrážky (Z) a odtoky (O) v povodí Jaloveckého potoka (horný obrázok) a v celom povodí Jaloveckého potoka vrátane podhorskej časti (dolný obrázok) v hydrologických rokoch 1989 – 2010.



Tab. 1. Porovnanie ročných zrážok a odtoku v povodí Jaloveckého potoka (1) a v celom povodí vrátane podhorskej časti (2) v hydrologických rokoch 1989 – 2010

Povodie	Plocha povodia [km <sup>2</sup> ]	Priemerná nadmorská výška [m]	Z <sub>min</sub> [mm]	Z <sub>priem</sub> [mm]	Z <sub>max</sub> [mm]	O <sub>min</sub> [mm]	O <sub>priem</sub> [mm]	O <sub>max</sub> [mm]
1	22	1 500	1 116	<b>1 601</b>	2 156	703	<b>1 019</b>	1 400
2	45	1 160	866	<b>1 186</b>	1 620	571	<b>754</b>	974

Poznámka: Z – zrážky, O – odtok



Obr. 4. A – priemerný ročný úhrn zrážok v období 1989 – 2008 v rôznych nadmorských výškach, B – sezónna variabilita gradientu mesačných zrážok s nadmorskou výškou

Poznámka: 1 – pri výpočte boli použité aj hodnoty z nadmorskej výšky 1 100 m (pozri A), 2 – pri výpočte neboli použité hodnoty z nadmorskej výšky 1 100 m

Charakteristický rast zrážok s nadmorskou výškou v horách významne ovplyvňuje nielen hydrologickú bilanciu, ale aj ekológiu konkrétnych lokalít. Nárast ročných zrážok v smere od podhoria k horám vyjadrený lineárnym gradientom je v priemere o 82 – 90 mm na 100 m nadmorskej výšky. V samotných horách nemusia byť rozdiely v ročných úhrnoch zrážok také veľké a závisia od polohy konkrétnej lokality. Vplyv umiestnenia lokality sa prejavuje najmä pri snehových zrážkach (nafukovanie alebo odvíjanie snehu vetrom). Na obr. 4A tento jav dokumentujú vysoké zrážky v nadmorskej výške 1 100 m. Zrážkomer bol umiestnený na lokalite, na ktorej dochádzalo v zime k navievaniu snehu.

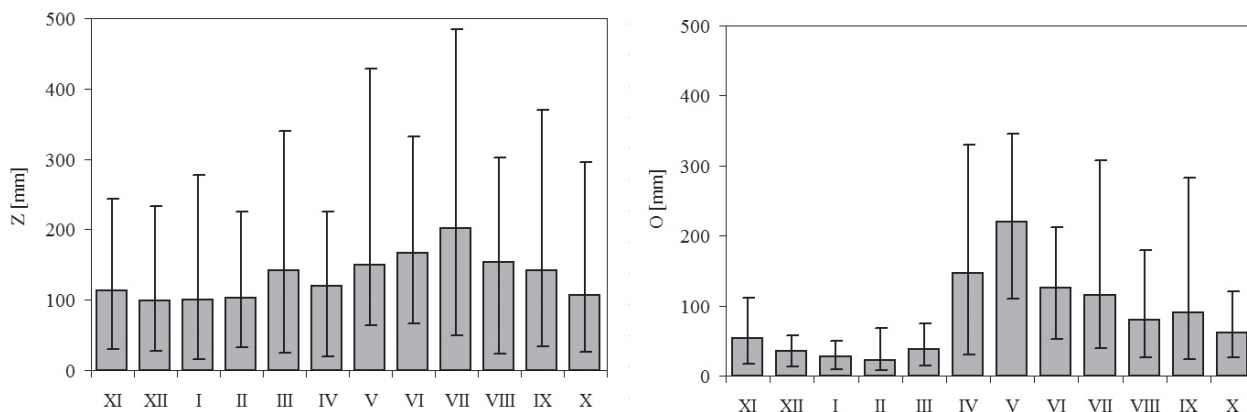
Hoci sa kvôli zjednodušeniu výpočtov, variabilite zrážkových úhrnov a nedostatku meracích staníc v horách rast zrážok s nadmorskou výškou pre dlhšie časové obdobie (napr. rok) obyčajne charakterizuje lineárnym gradientom, je známe, že od určitej nadmorskej výšky dochádza k jeho zmene (poklesu). Údaje z povodia Jaloveckého potoka naznačujú, že k tejto zmene prichádza približne okolo výšky 1 500 m n. m. Gradient zrážok s nadmorskou výškou sa mení aj počas roka. Priemerný rast mesačných úhrnov zrážok s nadmorskou výškou v povodí Jaloveckého

ho potoka vyjadrený lineárnym gradientom je okolo 6,5 mm.100 m<sup>-1</sup>. V jednotlivých mesiacoch sa však táto hodnota mení od 3,6 do 9,1 mm.100 m<sup>-1</sup> (obr. 4B). Pri krátkodobých (denných alebo hodinových) úhrnoch sa rast zrážok s nadmorskou výškou nemusí vôbec prejavovať. Hustota existujúcej zrážkomernej siete v našich horách však neumožňuje zovšeobecnenie poznatkov o detailoch priestorového rozdelenia krátkodobých úhrnov zrážok. Takýto výskum sa aj vo svete vykonáva len v krátkodobých štúdiách na malých územiach.

Maximálne denné úhrny zrážok v podhorskej časti povodia Jaloveckého potoka kolísali v rokoch 1989 – 2010 okolo 50 – 60 mm (15. 6. 2010), v horách presahovali 100 mm. Takéto úhrny zrážok spôsobili výrazné zvýšenie prietokov a lokálne zatonenie pivníc domov v podhorskej časti vodou z okolitých lúk, polí a vysokej hladiny podzemnej vody, ale ešte nie veľké záplavy spojené s vybrežením vodných tokov. Maximálny denný odtok z hôr v období 1989 – 2010 bol 26,5 mm, čo zodpovedalo prietoku približne 7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Priemerný denný odtok je 2,7 mm (0,7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Na porovnanie, maximálny denný odtok z celého povodia Jaloveckého potoka vrátane podhorskej časti v tom istom období bol 30,7 mm (16 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), priemer 2 mm (1,06 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Počas najväčšej povodne 20. storočia v tejto

časti severného Slovenska v júni 1958 bol denný odtok z celého povodia Jaloveckého potoka 29. 6. 1958 približne 96 mm (prietok takmer 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Nevieime, aké boli v tom období denné úhrny zrážok v povodí Jaloveckého potoka (v horách). Vo Vysokých Tatrách však výrazne prekročili 100 mm (Skalnaté Pleso 170 mm, Starý Smokovec 137, 4 mm, Štrbské Pleso 115,5 mm) a v Liptovskej kotline sa pohybovali od 49,3 mm vo Važci do 115,6 mm v Račkovej doline. Denný úhrn zrážok v Liptovskom Mikuláši, neďaleko záverečného profilu celého povodia Jaloveckého potoka bol 93,6 mm (Pacl, 1959).

Vyššie uvedené údaje poukazujú na to, že maximálne denné množstvo zrážok, ktoré sú schopné horské povodia v tejto oblasti „zadržať“, kým nastanú veľké záplavy, sa v horách pohybuje okolo 100 mm, v podhorí okolo 60 mm. Veľkosť týchto maximálnych hodnôt v konkrétnej situácii samozrejme závisí od predchádzajúceho počasia. Neplatia pre privalové povodne spôsobené veľkým množstvom zrážok za krátky čas. Takýchto udalostí (privalových povodní) sme v povodí Jaloveckého potoka zaznamenali málo. Najextrémnejšia z nich sa vyskytla 7. 8. 1994, keď v priebehu dvoch hodín spadlo v povodí asi 36 mm zrážok, čo spôsobilo takmer 16-násobné zvý-



Obr. 5. Priemerný mesačný úhrn zrážok (Z) a odtoku (O) v povodí Jaloveckého potoka v hydrologických rokoch 1989 – 2010 a maximálne a minimálne namerané hodnoty v jednotlivých mesiacoch

šenie prietoku v záverečnom profile povodia ( $z 0,254$  na  $4,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Táto udalosť však nespôsobilá v podhorskej časti povodia významné záplavy. Denný odtok z povodia Jaloveckého potoka v tento deň bol  $3,6 \text{ mm}$ , z celého povodia vrátane podhorskej časti len  $1,5 \text{ mm}$ .

Extrémnym prejavom hydrologického cyklu nie sú len povodne, ale aj sucho. Najsuchším rokom v povodí Jaloveckého potoka bol rok 2003. V septembri 2003 odtieklo z povodia za celý mesiac len  $24 \text{ mm}$ . Nie je to najmenší zaznamenaný mesačný odtok, lebo v zimných mesiacoch (najčastejšie vo februári) sa často vyskytujú aj oveľa nižšie mesačné odtoky (minimum vo februári 2006, len  $7,7 \text{ mm}$ ). V teplej časti roka boli však takéto nízke odtoky zriedkavé. Sezónna variabilita zrážok a odtoku v povodí Jaloveckého potoka vrátane rozsahu pozorovaných hodnôt v období 1989 – 2010 je znázornená na obr. 5.

\* \* \*

Povodie Jaloveckého potoka je jediné povodie na Slovensku, v ktorom dlhodobo prebieha systematický terénny hydrologický výskum horského prostredia.

Príspevok stručne predstavuje základné výsledky výskumu v Západných Tatrách, ktoré reprezentuje hydrologické pomery najvyššej časti Karpát. Druhá časť sa podrobnejšie venuje priebehu základných prvkov hydrologickej bilancie (zrážky, odtok) za posledných 22 hydrologických rokov, vrátane gradientov zrážok a extrémnych hodnôt zrážok a odtoku.

Ďalšiemu rozvoju poznatkov o hydrologických procesoch v tomto prostredí by pomohol multidisciplinárny výskum so zameraním na pôdny pokryv, evapotranspiráciu a zmenu vzťahov medzi dominantnými procesmi v rôznych mierkach (bod, svah, malé horské povodie, veľké povodie významnej rieky).

Autori ďakujú grantovej agentúre VEGA za podporu projektu 2/0042/11.

#### Literatúra

- Bandyopadhyay, J., Rodda, J. C., Kattelmann, R., Kundzewicz, Z. W., Kraemer, D.: Highland Waters – A Resource of Global Significance. In: Messerli, B., Ives, J. D. (eds.): Mountains of the World. A Global Priority, New York: The Parthenon Publishing Group, 1997, p. 131 – 156.
- Holko, L., Kostka, Z.: Hydrologický výskum vo vysokohorskom povodí Jaloveckého potoka. J. Hydrol. Hydromech., 2006, 54, s. 192 – 206.
- Holko, L., Kostka, Z.: Hydrological Processes in Mountains – Knowledge Gained in the Jalovecký Creek Catchment, Slovakia. IAHS Publ. 336, Wallingford, 2010, p. 84 – 89.
- Holko, L., Kostka, Z., Šanda, M.: Assessment of Frequency and Areal Extend of Overland Flow Generation in a Forested Mountain Catchment. Soil & Water Res., 2011, 6, 1, p. 43 – 53.
- Holko, L., Parajka, J., Majerčáková, O., Faško, P.: Hydrologická bilancia vybraných povodí Tatier v hydrologických rokoch 1989 – 1998. J. Hydrol. Hydromech., 2001, 49, 3 – 4, s. 200 – 222.
- Pacl, J.: Katastrofálna povodeň v oblasti Tatier v júni 1958. Zborník prác o Tatranskom národnom parku 1959, 3, s. 17 – 56.

RNDr. Ladislav Holko, PhD., [holko@uh.savba.sk](mailto:holko@uh.savba.sk)

RNDr. Zdeněk Kostka, PhD., [kostka@uh.savba.sk](mailto:kostka@uh.savba.sk)

Ing. Michal Danko, [danko@uh.savba.sk](mailto:danko@uh.savba.sk)

Ústav hydrológie SAV, Ondrašovská 16, 031 04 Lip-tovský Mikuláš

Ing. Soňa Liová, [sona.liova@shmu.sk](mailto:sona.liova@shmu.sk)

Slovenský hydrometeorologický ústav, Bôrická cesta, 011 80 Žilina