ACTA HYDROLOGICA SLOVACA

Ročník 17, č. 1, 2016, 43 – 50

HODNOTENIE ZMIEN ODTOKU VO VYBRANÝCH POVODIACH VYSOKÝCH TATIER DESAŤ ROKOV PO VETERNEJ KALAMITE

Ladislav Holko, Peter Škoda

Príspevok je venovaný prehodnoteniu zmien režimu odtoku v malých povodiach najviac postihnutých odlesnením súvisiacim s veternou kalamitou, ktorá postiha oblasť Vysokých Tatier v novembri 2004. Dlhšie obdobie, ktoré uplynulo od kalamity, umožnilo vyhodnotenie niektorých charakteristík odtokového režimu, ktoré sa doteraz nedali hodnotiť. V práci sme sa zamerali najmä na využitie čiat prekročenia prietoku. Porovnanie čiar prekročenia priemerného denného prietoku pre povodie Velického a Slavkovského potoka ukázalo, že prietoky s najväčšou pravdepodobnosťou prekročenia ($Q_{90\%}$ a $Q_{80\%}$) boli v desaťročí po kalamite (2005-2014) namerané častejšie, ako v období pred kalamitou (1965-2004). Po kalamite došlo aj k nárastu charakteristík minimálneho odtoku, ale podobné hodnoty sa v niektorých rokoch vyskytovali aj pred ňou. Po kalamite dochádzalo v týchto dvoch povodiach aj k častejším zmenám prietoku (pokles po predchádzajúcom raste a naopak, rast po predchádzajúcom poklese), ako pred kalamitou. Zistené zmeny však nemožno jednoznačne priradiť iba vplyvu kalamity, hoci v prvých rokoch po kalamite boli pravdepodobne spôsobené najmä ňou. Výsledky práce poukazujú na to, že v našich prírodných podmienkach nie sú k dispozícii vhodné indikátory, ktoré by jednoznačne ukázali vplyv redukcie odlesnenia o 20-32% na režim odtoku z horských povodí s plochou niekoľko desiatok štvorcových kilometrov. Hodnotenie zmien početnosti dosiahnutia prietokov s určitou pravdepodobnosťou prekročenia v povodiach s jednoznačne dokumentovanou veľkou disturbanciou je však oblasťou, ktorá si zasluhuje ďalší výskum.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: indikátory zmeny režimu odtoku, malé horské povodia, veterná kalamita, čiara prekročenia prietokov

ASSESSMENT OF RUNOFF CHANGES IN SELECTED CATCHMENTS OF THE HIGH TATRA MOUNTAINS TEN YEARS AFTER THE WINDTHROW. The article is devoted to re-evaluation of runoff data series from the small basins most affected by deforestation associated with windstorm which hit the High Tatra Mountains area in November 2004. A longer period that has elapsed since the windthrow facilitates evaluation of some runoff regime characteristics which could not have been evaluated with shorter data series. Further, we focused on the use of the flow duration curves (FDC). Comparison of FDCs calculated for daily data from the Velický and Slavkovský creek catchments showed that discharges with the highest probability of exceedance ($Q_{90\%}$ and $Q_{80\%}$) in the decade following the windthrow (2005-2014) occurred more frequently than in period 1965-2004. We also found an increase in runoff minima characteristics, but similar values were observed in some years also before the windthrow. Frequency of flow reversals in the Velický and Slavkovský catchment increased as well. The identified changes cannot be unambiguously assigned only to the impact of the windthrow. However, in the first years after the windthrow they were probably influenced mainly by it. Our results suggest that we do not have suitable indicators of catchment runoff changes for the mountain catchments with area of several tens of square kilometres in which the forest reduction reached 20-32%. Nevertheless, evaluation of changes in frequency of flows with certain probability of exceedance is a promising research topic for catchments with clearly documented large disturbances.

KEY WORDS: indicators of runoff regime change, small mountain catchments, windthrow, flow duration curve

Úvod

Veterná kalamita, ktorá zasiahla v novembri 2004 najmä oblasť Vysokých Tatier, spôsobila zničenie lesa na veľkej ploche (cca 120-140 km^2), čo vyvolalo obavy zo zmeny režimu odtoku a namä zo zvýšenia početnosti

povodňových situácií. Následné analýzy meraných údajov z malých povodí horného Popradu ležiacich na území postihnutom kalamitou nepreukázali dramatické zmeny (napr. Holko et al., 2009 a 2012; Halmová a Pekárová, 2011). Bičárová a Holko (2013) síce zistili zvýšenie prietokov klasifikovaných ako malé povodne v dvoch povodiach, ktoré patrili medzi tie, ktoré boli kalamitou najviac postihnuté, ale toto zvýšenie bolo pripísané skôr štatisticky významnému rastu počtu dní so zrážkovými úhrnmi dosahujúcimi 40-60 mm za deň, ako veternej kalamite. Napriek tomu, že odlesnenie spôsobené kalamitou muselo ovplyvniť hydrologický cyklus, hydrologická bilancia, veľkosť minimálnych a maximálnych prietokov, kvantily denných prietokov, počet a charakteristiky prietokových udalostí, index prívalovosti ani index základného odtoku sa neprejavili ako indikátory, ktoré by jednoznačne ukázali vplyv kalamity v mierke povodia (t.j. vplyv na odtok z povodia). Ako možné príčiny tejto skutočnosti bola spomenutá veľkosť odlesnenej plochy vzhľadom k ploche celého povodia, lokalizácia odlesnenej časti povodia vzhľadom na tvorbu odtoku (podstatná časť zrážok formujúcich odtok z povodia padá vo výškovom pásme, ktoré nebolo ani pred kalamitou zalesnené) a pôdnych a geologických pomerov v oblasti zasiahnutej kalamitou, ktoré sú tvorené morénami s veľkou mocnosťou sedimentov a dobrou priepustnosťou (Holko et al., 2009).

Vykonané analýzy poukázali na otázku indikátorov, umožňujúcich hodnotenie vplyvu podobných disturbancií na hydrologický cyklus v povodí. Problematika hodnotenia zmien režimu odtoku je v literatúre podrobne rozpracovaná najmä v prácach venovaných vplyvu regulácie odtoku ľudskou činnosťou na riečne ekosystémy. Podrobný prehľad nedávno publikoval Gopal (2013). Gao et al. (2009) uvádzajú, že bolo vyvinutých vyše 170 indikátorov zmien odtokového režimu charakterizujúcich rôzne zložky odtoku, mnohé z nich sú však navzájom nezávislé. Autori konštatujú, že indexy založené na analýze čiar prekročenia priemerných denných prietokov (tzv. ekodeficit a ekonadbytok) môžu byť dobrými indikátormi ovplyvnenia prietokov. Zaujímavé je tvrdenie Alilu et al. (2009), ktorí k otázke vzťahu lesa a povodní konštatujú, že závery mnohých štúdií sú nesprávne, pretože sú založené na nesprávnom použití štatistických analýz a vyzývajú na prehodnotenie záverov odbornej komunity v tomto smere. Podľa autorov odlesnenie, ktoré nemusí viesť k zvyšovaniu kulminačných prietokov veľkých povodní, môže spôsobiť zmenu početnosti výskytu prietokov a preto je potrebné hodnotenie oboch charakteristík. Pri hodnotení vplyvu odlesnenia na povodne podľa nich musí byť namiesto chronologického prístupu použité porovnávanie prietokov s rovnakou početnosťou výskytu. Aj Alila et al. (2009) vo svojej práci použili analýzy čiar prekročenia priemerných denných prietokov.

Od kalamity vo Vysokých Tatrách uplynulo jedenásť hydrologických rokov. Tento čas je síce krátky na to, aby sa dalo hodnotiť, či sa po kalamite zvýšila početnosť prietokov s malou pravdepodobnosťou prekročenia, je však možné hodnotenie početností prietokov s najväčšími pravdepodobnosťami prekročenia. Cieľom tohoto príspevku bolo prehodnotenie analýz odtokového režimu vo vybraných povodiach horného Popradu pomocou meraných údajov o dennom prietoku z 50 hydrologických rokov (1965-2014).

Skúmané územie a metodika

Na analýzu boli vybrané údaje z troch povodí horného Popradu. Vybrané fyzicko-geografické charakteristiky povodí sú uvedené v tabuľke 1. Dve z povodí (Velický potok a Slavkovký potok) boli výrazne postihnuté odlesnením spôsobeným veternou kalamitou, v treťom z nich (Mlynica) bolo odlesnenie oveľa menšie. Hoci prírodné pomery v povodiach nemôžu byť úplne rovnaké a odlišovať sa len veľkosťou odlesnenia, ktoré spôsobila veterná kalamita, takýto výber povodí čiastočne zodpovedá metodike párových povodí, ktorá sa často používala pri človekom riadených experimentoch (napr. zisťovaniu vplyvu odlesnenia na odtokový režim). Veterná kalamita je na rozdiel od takýchto štúdií „experimentom“ vyvolaným prírodou.

Rutinné hodnotenie zmien charakteristík odtoku bolo najprv urobené pomocou softveru IHA (Indicators of Hydrological Alteration, The Nature Conservancy, 2009). Tento nástroj počíta 67 charakteristík prietoku, z ktorých sme sa zamerali najmä na charakteristiky minimálnych a maximálnych prietokov (ročné minimum a maximum, 1-, 3-, 7- 30-dňové minimá a maximá), index základného odtoku, zložky odtoku (početnosť a dĺžka trvania vysokých a nízkych prietokov) a veľkosť a početnosť zmeny prietoku (nárast alebo pokles).

Tabuľka 1. Vybrané charakteristiky skúmaných povodí
Table 1. Selected characteristics of studied catchments

Povodie-záverečný profil	Plocha [km^2]	Priemerná nadmorská výška [m n. m.]	Priemerný sklon [°]	Lesnatosť pred kalamitou [%]	Zmenšenie lesnatosti spôsobené kalamitou [%]
Mlynica-Svit	83	991	9.2	43	5
Velický potok-Veľká	58	1094	9.3	42	20
Slavkovský potok-Matejovce	43	1017	8.6	49	32

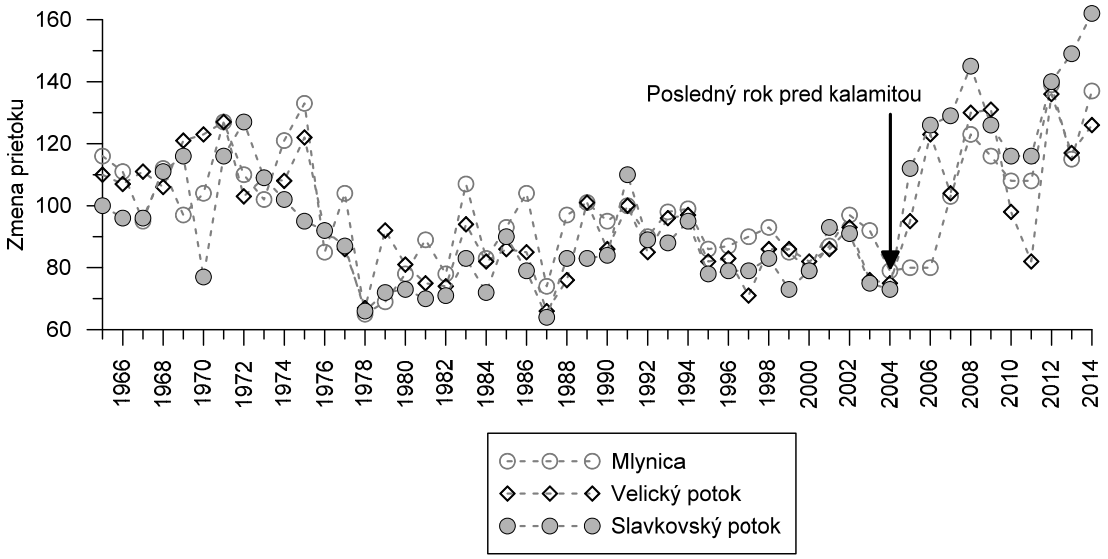
Vysoké prietoky boli definované ako tie, ktoré prekračujú 75% všetkých denných prietokov. Za nízke prietoky sme pokladali prietoky rovné alebo menšie ako 50% všetkých denných prietokov. Počet zmien prietoku hovorí o tom, koľkokrát počas roka sa zmenil prietok zo stúpajúceho na klesajúci a naopak. Priebeh všetkých charakteristík bol pre obdobie 1965-2015 hodnotený vizuálne z hľadiska veľkosti danej charakteristiky a porovnania jej priebehu do hydrologického roku 2004 (do výkytu kalamity) a od hydrologického roku 2005 (po kalamite).

Okrem rutinného hodnotenia charakteristík získaných pomocou IHA sme sa zamerali najmä na analýzu čiar prekročenia priemerných denných prietokov. Čiara prekročenia prietoku charakterizuje pravdepodobnosť prekročenia určitého prietoku počas daného obdobia (napr. Searsy, 1959). Čiary prekročenia prietokov majú v hydrológii široké uplatnenie - v inžinierskej hydrológii napríklad pri určovaní návrhových prietokov, navrhovaní hydroelektrární, pri výskume zanášania nádrží, ekologických štúdiách, ale aj pri výskume sucha (Vogel, 1994; Szolgay et al., 2003, Fendeková a Fendek, 2012). V tejto práci sme porovnali mediánové čiary prekročenia priemerného denného prietoku pre oddobie 1965-2004 (pred kalamitou) a 2005-2014 (po kalamite). Hodnotili sme početnosť výskytu denných prietokov s pravdepodobnosťou prekročenia 90%, 80%, 70% a 10% (ďalej $Q_{90\%}$, $Q_{80\%}$, $Q_{70\%}$ a $Q_{10\%}$) vypočítanou z mediánovej čiary prekročenia prietokov pre obdobie 1965-2004. Priebeh čiary prekročenia priemerného denného prietoku sa pre jednotlivé roky mení v závislosti od meteorologických podmienok v danom roku. Preto sme určili aj rozsahy variability ročných čiar prekročenia priemerného denného prietoku v dekádach 1965-1974, 1975-1984, 1985-1994, 1995-2004 a 2005-2014, aby bolo možné posúdiť, či zmeny po kalamite majú charakter systematického posunu alebo či sú spôsobené len extrémnejšími meteorologickými podmienkami v niektorých rokoch.

Výsledky a diskusia

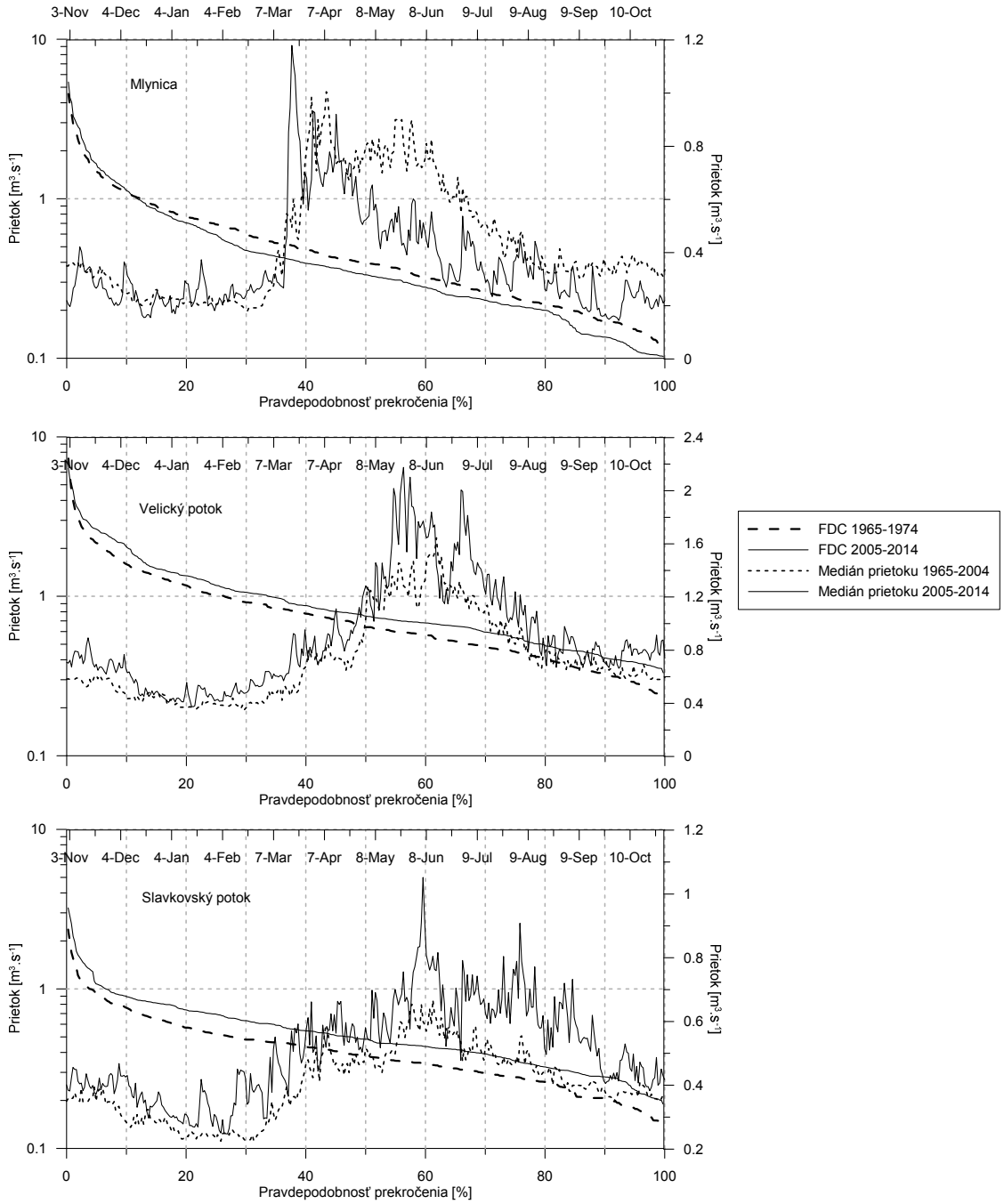
Výsledky analýzy prietoku pomocou softvéru IHA nepoukázali na výrazný vplyv kalamity. Po kalamite sa síce prejavil nárast charakteristík minimálneho prietoku, ale neboli prekročené hodnoty pozorované pred ňou. Jedinou charakteristikou, ktorá pravdepodobne poukazuje na vplyv kalamity, je počet zmien prietoku, ktorý sa najmä v povodí Slavkovského potoka v rokoch nasledujúcich po kalamite (2005 a 2006) výrazne zvýšil (obr. 1).

Početnosť zmien prietoku z klesajúceho na stúpajúci alebo naopak môže byť prejavom meteorologických činiteľov v danom roku (napr. viac zrážkových udalostí, častejšie obdobia sucha alebo väčší počet snehových odmäkov), ale môže byť ovplyvnená aj podmienkami tvorbu odtoku v povodí. Tento indikátor preto môže čiastočne odzrkadľovať aj vplyv veternej kalamity v povodí Velického a najmä Slavkovského potoka v hydrologických rokoch 2005 a 2006. Index prívalovosti (Baker et al., 2004), ktorý tiež ukazuje zmenu reakcie odtoku z povodia (napr. Holko et al., 2011), však vplyv kalamity neindikoval. Variabilita počtu zmien prietoku je od roku 2008 vo všetkých troch povodiach podobná, z čoho usudzujeme, že vysoké hodnoty dosahované od roku 2008 sú skôr prejavom vplyvu meteorologických činiteľov, ako kalamity. Vysoké hodnoty (aj keď o niečo nižšie) boli vo všetkých povodiach aj v minulosti na začiatku 70. rokov 20. storočia.



Obr. 1. Počet dní so zmenou denného prietoku (zo stúpajúceho na klesajúci alebo naopak) v hydrologických rokoch 1965-2014.
Fig. 1. Frequency of flow reversals (from increasing to decreasing and vice versa) in hydrological years 1965-2014.

Porovnanie mediánových čiar prekročenia priemerného denného prietoku pre obdobia 1965-2004 a 2005-2014 ukazuje rôzny priebeh v kalamitou málo postihnutom povodí Mlynice a v oveľa viac postihnutých povodiach Velického a Slavkovského potoka (obr. 2). Kým v povodí Mlynice nastal po roku 2004 posun smerom nadol (t.j., prietok s danou pravdepodobnosťou prekročenia sa znížil), v povodiach Velického a Slavkovského potoka to bolo naopak. V povodí Velického potoka sa zvýšili prietoky s pravdepodobnosťou prekročenia cca $Q_{60\%}$ až $Q_{100\%}$. Prietoky s najmenšou pravdepodobnosťou prekročenia sa v tomto povodí po kalamite nezvýšili, ale zýšili sa v povodí Slavkovského potoka, ktoré bolo v dôsledku kalamity oveľa viac odlesnené (obr. 2).

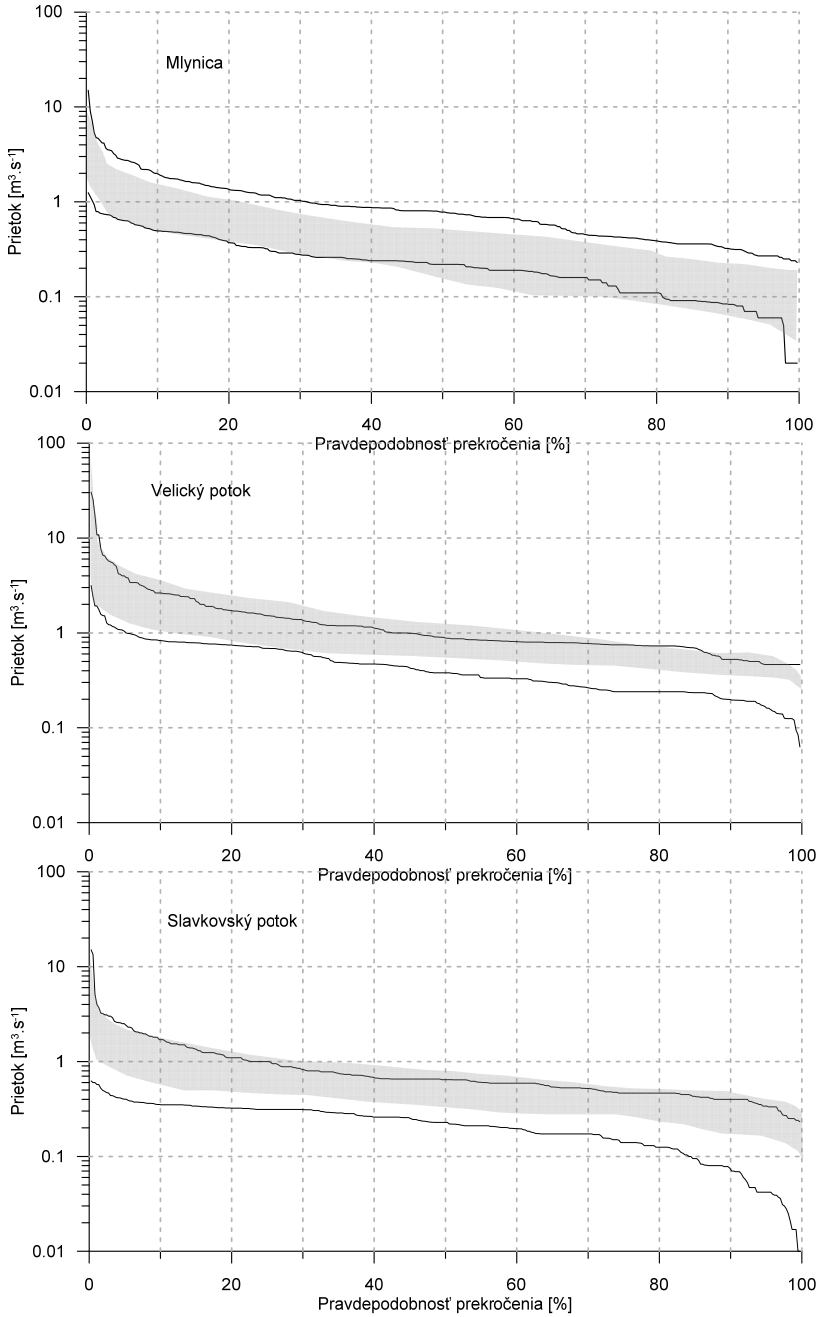


Obr. 2. Mediánové čiary prekročenia prietokov (FDC) a medián priebehu denných prietokov počas hydrologického roka pre obdobia 1965-2004 (do kalamity) a 2005-2014 (po kalamite).

Fig. 2. Median flow duration curves (FDC) and median of seasonal variability of daily discharges for periods 1965-2004 (before the windthrow) and 2005-2014 (after the windthrow).

Medián ročného priebehu prietokov v povodí Mlynice poukazuje na skoršie topenie snehu po roku 2004. Zaujímavá je rozkolísanosť denných prietokov, ktorá bola po kalamite vo všetkých povodiach väčšia, ako pred ňou. V povodí Velického potoka, ktoré má najväčšiu priemernú nadmorskú výšku (t.j. možno predpokladať relatívne najstabilnejší priebeh akumulácie a topenia snehu), bolo zväčšenie rozkolísanosti prietokov v zimnom období menšie, ako v ostatných dvoch povodiach.

Aj porovnanie mediánových čiar prekročenia priemerného denného prietoku pre dekády 1965-1974, 1975-1984, 1985-1994, 1995-2004 and 2005-2014 ukázalo, že pre povodia Velického a Slavkovského potoka boli čiary v dekáde 2005-2014 najviac posunuté smerom k vyšším prietokom pri danej pravdepodobnosti prekročenia. V povodí Mlynice to bolo naopak – čiara pre obdobie 2005-2014 bola najnižšie zo všetkých dekadálnych čiar. Porovnanie rozsahov ročných čiar prekročenia priemerného denného prietoku (obr. 3) tiež naznačuje, že po kalamite došlo k zmenám.

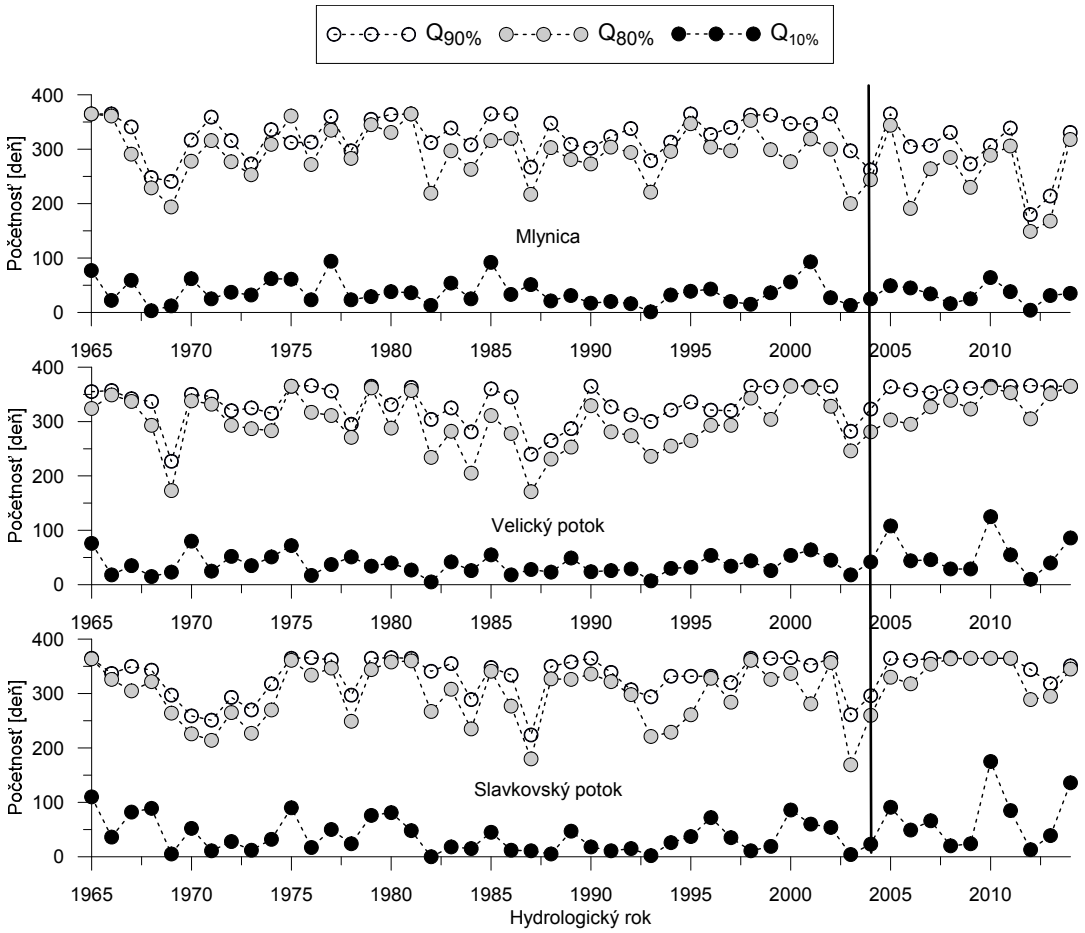


Obr. 3. Porovnanie rozsahov ročných čiar prekročenia priemerného denného prietoku pre obdobie 1965-2004 (čierne čiary) a 2005-2014 (sivá plocha).

Fig. 3. Ranges of annual flow duration curves for periods 1965-2004 (lines) and 2005-2014 (grey areas).

Nad mediánovou čiarou určenou pre obdobie 2005-2014 však vo všetkých povodiach výraznejšie ležali len tri čiary – pre rok 2005, 2010 a 2014. Rok 2005 mal snehovo bohatú zimu a daždivý začiatok leta. Rok 2010 priniesol povodne takmer na celom území Slovenska a leto 2014 bolo s ohľadom na pomery v posledných rokoch tiež vlhké. Z toho usudzujeme, že posun čiary prekročenia prietokov v dekáde 2005-2014 nebol spôsobený len vplyvom odlesnenia. Je prejavom kombinovaného vplyvu odlesnenia a meteorologických činiteľov, ale podiel týchto dvoch zložiek nevieme odlíšiť.

Početnosť prietokov $Q_{90\%}$, $Q_{80\%}$ a $Q_{10\%}$ v hydrologických rokoch 1965-2014 je znázornená na obr. 4. V kalamitou málo ovplyvnenom povodí Mlynice bol zaujímavý veľmi malý počet dosiahnutia prietokov $Q_{90\%}$ a $Q_{80\%}$ v rokoch 2012 a 2013, ktorý bol najmenší za celé skúmané obdobie. V povodí Slavkovského potoka bol takmer vo všetkých rokoch po kalamite počet dní s dosiahnutým prietokom $Q_{90\%}$ rovný alebo blízky maximu, t.j. 365 dňom v roku. Pred kalamitou taký vysoký počet za sebou idúcich rokov s dosiahnutým prietokom $Q_{90\%}$ v tomto povodí nebol zaznamenaný. Podobný jav sa v povodí Slavkovského potoka ukázal aj pri prietoku $Q_{80\%}$. V povodí Velického potoka s menším odlesnením sme ho zaznamenali len pri prietoku $Q_{90\%}$. Tento jav podľa nášho názoru najviac z použitých charakteristík poukazuje na možný vplyv kalamity. V povodí Velického potoka početnosť dosiahnutia prietoku $Q_{10\%}$ v roku 2005 prekročila maximum dosiahnuté v ostatných rokoch skúmaného obdobia a bola prekročená iba v povodňovom roku 2010. V roku 2005 sa však práce na ostraňovaní kalamity vo Vysokých Tatrách ešte len rozbiehali. Preto predpokladáme, že nárast početnosti $Q_{10\%}$ v tomto roku bol spôsobený skôr snehovo bohatou zimou a daždivým začiatkom leta, ako samotnou kalamitou (povodie má najväčšiu priemernú nadmorskú výšku a preto pravdepodobne aj najväčšie zásoby snehu, jeho dlhšie topenie a možno aj vyšší úhrn zrážok).



Obr. 4. Počet dní s dosiahnutými prietokmi $Q_{90\%}$, $Q_{80\%}$ a $Q_{10\%}$ určenými z mediánovej čiary prekročenia prietokov pre obdobie 1965-2004 v hydrologických rokoch 1965-2014; zvislá čiara označuje posledný rok pred kalamitou.

Fig. 4. Frequencies of $Q_{90\%}$, $Q_{80\%}$ a $Q_{10\%}$ Q_{90}, Q_{80} a Q_{10} calculated from the median flow duration curve for period 1965-2004 in hydrological years 1965-2014; the vertical line shows the last year before the windthrow.

Záver

Ani dlhšie rady prietokových údajov z vysokotatranských povodí najviac postihnutých veternou kalamitou, v ktorých existujú merané udaje, nepoukázali na dramatické zmeny odtokových pomerov v mierke povodia s plochou niekoľko desiatok kilometrov štvorcových a odlesnením cca 20-32%. Len dve charakteristiky indikovali možný vplyv kalamity – počet zmien denného prietoku (tiež iba čiastočne) a početnosť výskytu prietokov s pravdepodobnosťou prekročenia $Q_{90\%}$ a $Q_{80\%}$. Možno teda konštatovať, že zatiaľ nemáme k dispozícií indikátory, ktoré by v takýchto podmienkach (malé horské povodia s dobre priepustnými pôdami, v ktorých odlesnenie postihlo len časť povodia, ležiacu navyše v nižšie položenej oblasti, ktorá sa kvôli menším úhrnom zrážok nepodieľa dominantne na tvorbe celkového odtoku z povodia) jednoznačne poukázali na vplyv kalamity. Napriek opatrnosti, ktorá je potrebná pri interpretácii čiar prekročenia priemerného denného prietoku, je hodnotenie zmeny dosiahnutia prietokov s určitou pravdepodobnosťou prekročenia oblasťou, ktorá si zaslúži väčšiu pozornosť a ďašie analýzy v iných povodiach s jednoznačne dokumentovanou výnimočnou disturbanciou.

Poďakovanie

Táto práca vznikla v rámci projektu VEGA 2/0055/15.

Literatúra

Alila, Y., Kuras´, P.K., Schnorbus, M., Hudson, R. (2009): Forests and floods: A new paradigm sheds light on age-old controversies, Water Resour. Res., 45, W08416, doi:10.1029/2008WR007207.

Baker, D.B., Richards, P.R., Loftus, T.T., Kramer, J.W. (2004): A new flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. J. Am. Water Res. Assn., April 2004: 503 – 522.

Bičárová, S., Holko, L. (2013): Changes of characteristics of daily precipitation and runoff in the High Tatra Mountains, Slovakia over the last fifty years. Contributions to Geophysics and Geod. Vol. 43/2, 157–177.

Fendeková, M., Fendek, M. (2012): Sucho v povrchových a podzemných vodách Hornonitrianskej kotliny. Podzemná voda, XVIII, 1, 65 – 74.

Gao, Y., Vogel, R. M., Kroll, Ch. N., Poff, L., Olden, J.D. (2009): Development of representative indicators of hydrologic alteration. J. of Hydrol., 374, 136 – 147.

Gopal, B. (2013): Methodologies for the Assessment of Environmental Flows. In: Environmental Flows. An Introduction for Water Resources Mmanagers. (Ed. B. Gopal), National Institute of Ecology, New Delhi, India, 129 – 182.

Halmová D., Pekárová, P. (2011): Statistical evaluation of the extreme flood and drought changes in the Belá river basin. Influence of Anthropogenic Activities on Water Regime of Lowland Territory. Physics of Soil Water, Vinianske jazero Lake, May, 17 – 19.

Holko, L., Parajka, J., Kostka, Z., Škoda, P., Blöschl, G. (2011): Flashiness of mountain streams in Slovakia and Austria. Journal of Hydrology, 405, 392 – 401.

Holko, L., Fleischer, P., Novák, V., Kostka, Z., Bičárová, S., Novák, V. (2012): Hydrological Effects of a Large Scale Windfall Degradation in the High Tatra Mountains, Slovakia. In: Management of Mountain Watersheds (Editors J. Křeček, M.J. Haigh, T. Hofer and E. Kubin), Springer, 164 – 179.

Holko, L., Hlavatá, H., Kostka, Z., Novák, J. (2009): Hydrological regimes of small catchments in the High Tatra Mountains before and after extraordinary wind-induced deforestation. Folia Geographica, Series Geographica-physica, vol. XL 2009, 33 – 44.

Searsy, J.K. (1959): Flow-Duration Curves. Geological Survey Water-Supply Paper 1542-A, Washington, 33 s.

Szolgay, J., Kohnová, S., Hlavčová, K. (2003): Neistoty určovania návrhových prietokov. Životné prostredie, 37, 4, 194 – 199.

The Nature Conservancy (2009): Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual.

Vogel, R.M. (1994): Flow-Duration Curves. I. New Interpretation And Confidence Intervals. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 120, No. 4, July/August 1994, 485 – 504.

ASSESSMENT OF RUNOFF CHANGES IN SELECTED CATCHMENTS OF THE HIGH TATRA MOUNTAINS TEN YEARS AFTER THE WINDTHROW

Extraordinary windthrow which hit the High Tatra Mountains area in November 2014 raised concerns about increased flood frequency in the area. Subsequent analyses (e.g. Holko et al., 2009 a 2012; Halmová a Pekárová, 2011) did not confirm dramatic changes in water balance, minimum and maximum flows, quantiles of daily flows, number and characteristics of runoff events, flashiness indes and baseflow. A great number of indicators of flow regime changes has been developed worldwide (Gopal, 2013). More than ten years which elapsed since the windthrow provided an opportunity to evaluate some characteristics which could not have been evaluated with shorter data series. Inspiration for such analysis came from the works of Gao et al. (2009) and especially Alila et al., (2009) who both used indicators derived from the flow duration curves. The results presented in this work are based on 50 years of daily discharge data (1965-2014) from three selected mountain catchments in the High Tatra Mts. area. Forest reduction caused by the windthrow was

relatively high (20 and 32%, respectively) in two of them (the Velický and the Slavkovský creek catchments) and small in the last one (the Mlynica catchment, Table 1). Thus, comparison of flow characteristics for such catchments adopted the principle applied worldwide in numerous paired catchment studies. Unlike paired catchment studies which were controlled by the man, the disturbance in the High Tatra Mountains was "an experiment" designed by the nature.

We first conducted a routine analysis using the IHA software (Indicators of Hydrological Alteration, The Nature Conservancy, 2009) whereby we focused on characteristics of minimum and maximum flows, baseflow index and flow components. Although we found an increase in characteristics of minimum flows (e.g. 1-, 3-, 7- and 30-days minima), the values did not exceed the values observed before the windthrow. However, frequency of flow reversals clearly increased after the windthrow in the Velický and the Slavkovský creek catchments (Fig. 1). This indicator could partially reflect the influence of the windthrow in the first years after it (2005 and 2006).

Except the evaluation of the IHA-computed characteristics we focused mainly on the analysis of flow duration curves. Median flow duration curves for periods 1965-2004 and 2005-2014 as well as for decades 1965-1974, 1975-1984, 1985-1994, 1995-2004 a 2005-2014 documented a shift toward higher values of discharge with certain probability of exceedance after the windthrow (Fis 2 and 3). However, annual FDCs showed that only three curves (for hydrological years 2005, 2010 and 2014) plotted above the decadal FDC for period 2005-2014. All these curves were connected with wetter meteorological conditions. We have thus concluded that the shift in the median FDC for decade 2005-2014 was not caused only by the windthrow. Frequencies of Q_{90}, Q_{80} a Q_{10} plotted in Fig. 4 seem to be the best indicators of the influence of windthrow. Behaviour of annual frequencies of discharges with probability of exccedance 90% in the Velický and Slovakovský creek catchments clearly changed after the windthrow.

We concluded that neither longer runoff data series indicated dramatic change in catchment runoff. Only two characteristics, i.e. nuber of flow reversals and frequency of daily flows with probablility of exceedance 90% and 80% seem to show the influence of windthrow.

In other words, we do not have reliable indicators of the influence of deforestation for small mountain catchments of central Europe. Further analyses of runoff data series from catchments with documented disturbance represent a promising research topic for future studies.

RNDr. Ladislav Holko, CSc.
Ústav hydrológie SAV
Experimentálna hydrologická základňa
Ondrašovecká 16
03105 Liptovský Mikuláš
E-mail: holko@uh.savba.sk

RNDr. Peter Škoda
Slovenský hydrometeorologický ústav
Jeséniova 17
833 15 Bratislava
E-mail: peter.skoda@shmu.sk