

Variabilita topenia snehu v horskom mikropovodí

Snowmelt variability in mountainous microcatchment

Pavel Krajčí (1988), Michal Danko (1983)

krajci@uh.savba.sk, danko@uh.savba.sk

Experimentálna hydrologická základňa ÚH SAV, Ondrašovská 16, 031 04 Liptovský Mikuláš

Abstract

Snow accumulation and melt are highly variable. Therefore, correct modeling of spatial variability of the snowmelt, timing and magnitude of catchment runoff still represents a challenge in mountain catchments. Although floods caused solely by melting snow are not very frequent, improved knowledge on spatial variability of snow accumulation and melt transferred into better models may thus help with operational forecasting, reservoir management or estimation of runoff changes in mountain areas caused by climate change impacts. The article presents results of detailed field measurements of snow related characteristics in a mountain microcatchment (area 59 000 m², mean altitude 1509 m a. s. l.) in the Western Tatra Mountains, Slovakia obtained in winter 2015/2016. Simple snow lysimeters indicated that variability of snowmelt and discharge measured at the catchment outlet corresponded well with the rise of air temperature above 0°C. Main snow melt period was between 31st March and 7th April. Snow melt intensities were connected with vegetation cover. Differences in degree-day factors between open area and forest reached significant values of more than 5 mm day⁻¹°C⁻¹. Obtained data together with standard climatic data (precipitation and air temperature) are interesting inputs to the hydrological modeling of snow melt and discharge.

Keywords: Snow melt; Degree-day factor; mountainous microcatchment; Snow lysimeter.

Kľúčové slová: topenie snehu; teplotný faktor; horské mikropovodie; snehový lýzimeter.

Anotácia

Príspevok sa venuje časovej a priestorovej variabilite topenia snehu v horskom mikropovodí. Analýzy vychádzajú hlavne z terénnych meraní vodnej hodnoty snehu, odtoku z topenia snehovej pokrývky, prietoku a analýzy izotopického zloženia vody v zimnej sezóne 2015/2016.

Úvod a ciele

Akumulácia a topenie snehu sú veľmi premenlivé. Preto je správne modelovanie priestorovej variability topenia snehu, jeho časového priebehu a veľkosti odtoku stále výzvou v horských povodiach. Tieto procesy môžu podliehať veľmi rýchlym a výrazným zmenám v čase a priestore (Pomeroy a Brun, 2001). Ak chceme, aby predpovedné modely používané v hydrologickej operatívnej praxi čo najlepšie vystihovali realitu, musíme sa snažiť pochopiť procesy, ktoré prebiehajú v reálnom prírodnom prostredí. Dôležité je snažiť sa odhaliť faktory, ktoré najviac ovplyvňujú tvorbu odtoku z povodia.

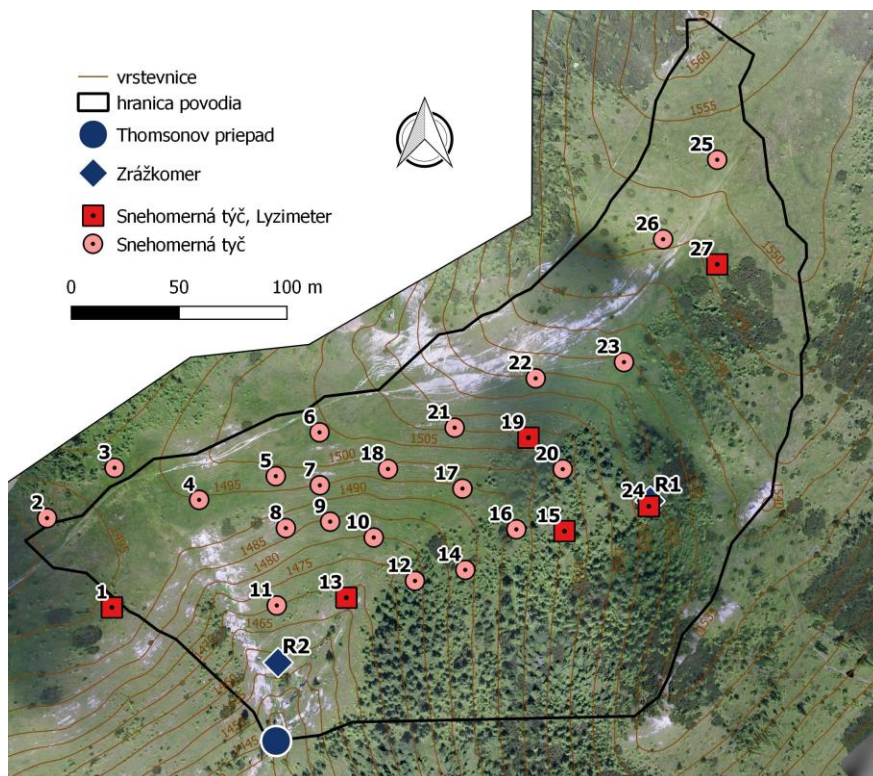
Čo sa týka topenia snehu, je dôležitým parametrom teplota vzduchu. V hydrologickej praxi sa stále používajú relatívne jednoduché modely topenia snehu založené na teplotnom faktore. Teplotný faktor (degree-day factor - DDF) predstavuje množstvo vody v milimetroch za deň, ktoré sa uvoľní pri raste teploty vzduchu nad kritickú hodnotu pre každý stupeň kladnej teploty vzduchu (Holko et al. 2012). Teplotnému faktoru sa v minulosti venovala veľká pozornosť. Martinec (1963) uvádza hodnoty teplotného faktora od 2,4 do 5 mm deň⁻¹°C⁻¹. Hock (2003) v rozsiahlejšej štúdií, ktorá zahŕňala výsledky meraní z rôznych starších prác uvádzala hodnoty DDF od 2,5 po 4,9 mm deň⁻¹°C⁻¹. Holko et al. (2012) uvádza v povodí Jaloveckého potoka na stanici v Červenci (1500 m n. m.) ako najčastejšie hodnoty 4 - 4,5 mm deň⁻¹°C⁻¹. Metóda DDF púta stále pozornosť a venujú sa jej mnohé práce aj v súčasnosti. Napríklad Hamlin et al. (1998), Ohmura (2000), Singh et al. (2000), DeWalle et al. (2002), Debele et al. (2010), Bocchiola et al. (2010), Tobin et al. (2013). V našom prípade sme použili DDF na vyhodnotenie rôznej intenzity topenia v rôznych častiach skúmaného mikropovodia.

Cieľom tejto práce je teda odhaliť časovú a priestorovú variabilitu topenia snehovej pokrývky v zimnej sezóne 2015/2016 (ďalej zima 2016). Tento cieľ nie je samoúčelný, pretože poznatky získané pri podrobných meraniach v takomto malom povodí sa budeme snažiť využiť aj v rádovo väčších horských povodiach pri modelovaní prietoku.

Materiál a metódy

Skúmané územie sa nachádza v Západných Tatrách v severnej časti Slovenska. Tvorí pramennú oblasť Sokolného jarku, ktorý je pravostranným prítokom Jaloveckého

potoka. Merania v zimnej sezóne 2015/2016 nadväzujú na sezónu 2014/2015. Sezóna 2014/2015 je podrobnejšie popísaná v práci Krajčí et al. (2016). Medzi týmito dvoma zimami prebehli zmeny v prístrojovom vybavení, ako aj v rozmiestnení bodových meraní. Pribudli tu prístroje na automatické meranie zrážok, vlhkosti pôdy, teploty pôdy a prebiehal tu aj zber vzoriek vody pre analýzu izotopov vodíka a kyslíka. Meracia sústava pozostávala z 27 bodov s meraniami vodnej hodnoty a výšky snehu. Na každom bode bola umiestnená snehomerná tyč. Pri niektorých bodoch boli merané aj ďalšie parametre ako zrážky, teplota pôdy či odtok z topenia sa snehu (obr. 1). Všetky tieto merania sú popísané v nasledujúcich kapitolách. Rozmiestnenie meracích prístrojov v povodí je



povodí je
obrázok 1.

Obr. č. 1. Rozmiestnenie meracích prístrojov v skúmanom území počas zimy 2015/2016

Meranie zrážok

Zrážky boli v povodí merané pomocou dvoch váhových zrážkomerov OTT Pluvio (R1 a R2 na obr. 1.).

Meranie odtoku z topenia snehovej pokrývky

Na meranie odtoku z topenia snehovej pokrývky sme použili malé snehové lyzimetre. Konštrukcia je popísaná v článku Krajčí et al. (2016). V povodí bolo rozmiestnených šesť snehových lyzimetrov v tesnej blízkosti meracích bodov číslo 1, 13, 15, 19, 24,

27. Stabilné a kvalitné merania bez veľkých výpadkov poskytli hlavne lyzimetre číslo 1, 15 a 19. Pri ostatných lyzimetoch došlo k mechanickému poškodeniu, prípadne k väčším výpadkom meraní, ktoré znemožnili použitie väčšiny údajov v ďalších analýzách. Spomenuté tri lyzimetre poskytli zaujímavý prehľad o topení snehu v rôznych častiach povodia, ktoré sa líšili orientáciou voči svetovým stranám či vegetáciou.

Meranie výšky a vodnej hodnoty snehu

Výška snehu bola meraná manuálne ako súčasť meraní vodnej hodnoty snehu pri 27 snehomerných tyčiach. Vodná hodnota snehu (VHS) bola meraná na 27 bodoch klasickým váhovým snehomerom. Tieto body sa nachádzali priamo v povodí, okrem bodov číslo 1, 2 a 3, ktoré však boli umiestnené v tesnej blízkosti rozvodnice. VHS bola meraná v častiach povodia s rôznou vegetáciou. Body 12, 14, 15, 16, 20, 24 sa nachádzali v zalesnenej časti povodia. Body 1, 19, 27 v oblasti s nízkou vegetáciou (kosodrevina, mladý smrekový porast). Ostatné body sa nachádzali na voľnej ploche (trávnatý porast, sutina). V úvode zimnej sezóny (december, január) prebiehali merania raz mesačne, no postupne sa časový interval medzi meraniami znižoval. VHS bola meraná v deviatich termínoch.

Ostatné meteorologické prvky

Približne 700 metrov od skúmaného územia sa nachádza automatická meteorologická stanica Ústavu hydrológie SAV, Červenec (CE1500), kde sú v desaťminútovom kroku merané viaceré parametre. Pre túto prácu bola relevantná hlavne teplota vzduchu.

Teplota na povrchu pôdy

Teplotu na rozhraní pôda, sneh sme v povodí merali na 27 lokalitách teplomermi Minikin s presnosťou $\pm 0,15$ °C. Takto získané údaje nám umožnili relatívne presne určiť čas úplného roztopenia snehu na danej lokalite. Prítomnosť snehu sa v prvom kroku určovala automatickou metódou, ktorá zohľadňovala teplotu vzduchu a rozdiely medzi teplotou vzduchu a teplotou nameranou na jednotlivých teplomeroch. Ak bola teplota ustálená okolo 0 °C, považovali sme daný bod za pokrytý snehom. Keď teplota stúpala nad bod mrazu, alebo keď začala kopírovať zmeny teploty vzduchu, považovali sme sneh na danom bode za úplne roztopený.

Vzorky vody pre analýzu izotopického zloženia.

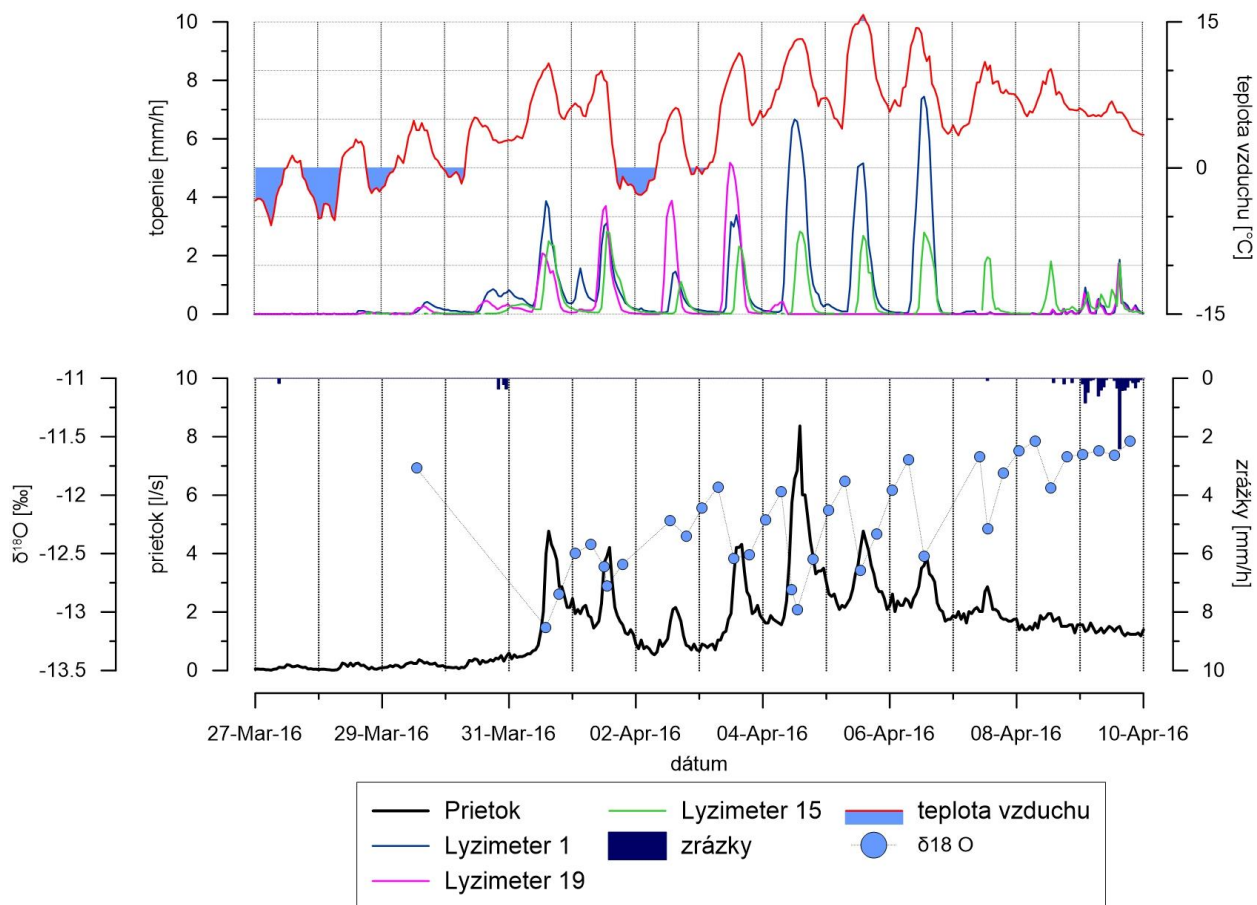
Pomocou analýzy izotopov vodíka a kyslíka je možné určovať podiel vody z topiaceho sa snehu na odtoku z povodia. Použili sme metódy, ktoré sú popísané podrobnejšie v práci Holko et al. (2013). Na zber kumulatívnych vzoriek vody z topiaceho sa snehu boli použité pasívne kapilárne vzorkovače (obr. 4). Podrobnejšie údaje o vzorkovačoch uvádzajú Penna et al. (2014). Počas zimnej sezóny 2015/2016 boli umiestnené na piatich rôznych lokalitách skúmaného územia. Na každej lokalite bolo umiestnených 5 vzorkovačov na zaznamenanie variability izotopického zloženia vody z topiaceho za

snehu. Vzorkovače boli inštalované tesne pred začiatkom ukladania snehovej pokrývky. Po roztopení snehu bola z každého vzorkovača odobraná vzorka, ktorá reprezentuje izotopické zloženie vody, ktorá infiltrovala do pôdy počas topenia snehu. Okrem týchto vzoriek sme počas obdobia topenia snehu pomocou automatického vzorkovača odoberali aj vzorky vody so Sokolného jarku. Krok odberu týchto bol na začiatku topenia snehu 6, neskôr 12 hodín (Obr. 4).

Výsledky

Časový priebeh topenia

Hlavná fáza topenia v zime 2016 prebiehala v posledných dňoch marca a prvej dekáde apríla, keď nastala perióda teplého, slnečného počasia (obr. 2). Teplota vzduchu prekročila bod mrazu už 27.3., no topenie na lyzometroch sa ešte neobjavilo. Neprejavilo sa to ani na prietokoch. Prvé topenie bolo zaznamenané 29.3., hodnoty však boli nízke aj napriek teplote vzduchu až 5,2 °C dosiahnutej o 11:00. Toto oneskorenie naznačuje, že na začiatku tejto periódy snehová pokrývka ešte nebola premenená a ešte nedosiahla izotermiu v celom svojom profile, čo je podmienkou odtoku z topenia snehovej pokrývky. Nasledujúcu noc neklesla teplota vzduchu pod 2 °C a hodnoty odtoku z topenia už výrazne narástli. Súčasne narástol aj prietok. Naznačuje to, že sa už voda z topenia snehu dostala až do záverečného profilu povodia. V nasledujúcich dňoch bol zreteľný denný chod s maximom prietoku medzi 14:00 a 15:00. Topenie na lyzimeroch malo veľmi podobný priebeh ako prietok. Maximum prietokov bolo dosiahnuté 4.4.2016, 8,37 l s⁻¹. Z analýzy izotopu ¹⁸O vidieť na obr. 2 chod takmer inverzný s chodom prietoku. To naznačuje, že v tomto období pochádzala voda v toku z topenia snehovej pokrývky, a nie z vody, ktorá sa v povodí nachádzala už skôr. Od piateho apríla už začali hodnoty prietoku klesať aj napriek tomu, že teplota vzduchu naďalej rástla. V tomto čase už bola väčšia časť povodia bez snehovej pokrývky. Od siedmeho apríla sa prejavil nižší podiel vody zo snehu aj na izotopickom zložení, čo len potvrdzuje ukončenie hlavnej fázy topenia snehu. Desiateho apríla už začali prietok ovplyvňovať hlavne kvapalné zrážky, aj keď sa na niektorých miestach povodia nachádzala ešte snehová pokrývka.



Obr.2. Časový priebeh topenia na lyzimetoch a prietoku na konci marca a začiatku apríla 2016. Horná časť - teplota vzduchu, lyzimetre. Spodná časť - prietok na záverečnom profile povodia, zrážky.

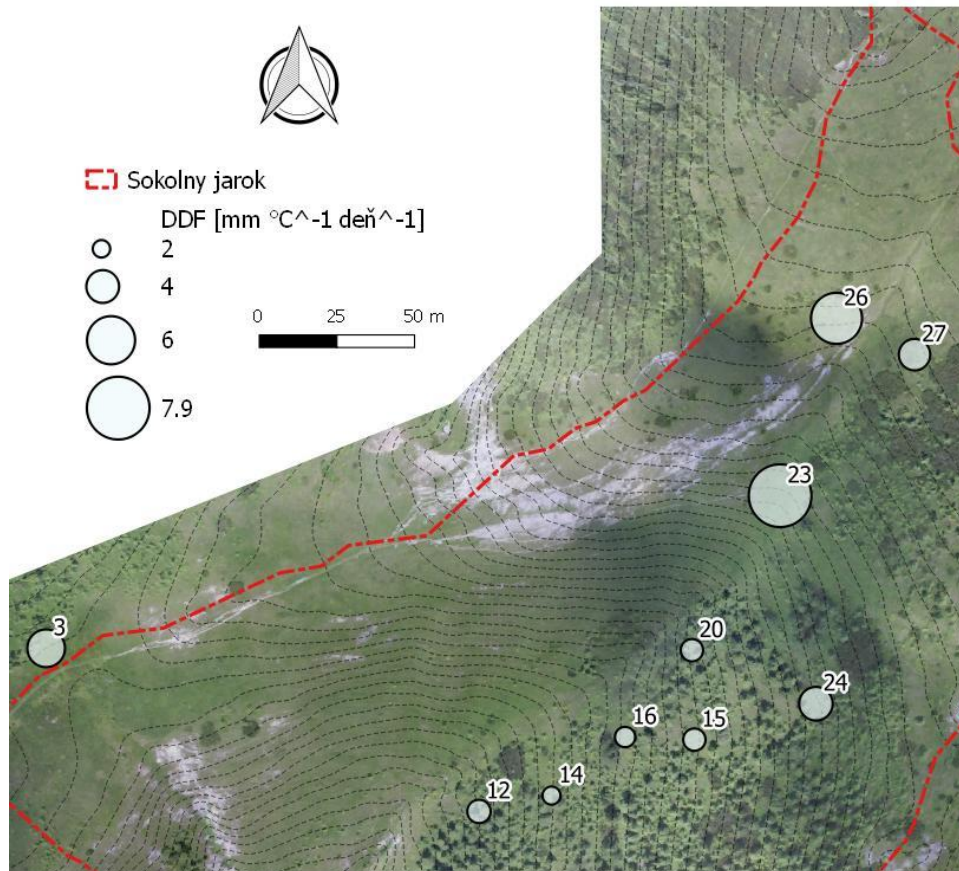
Priestorová variabilita topenia

Z obr. 2. sú už na prvý pohľad zjavné výrazné rozdiely v topení na jednotlivých lyzimetoch. Relatívne nízke hodnoty dosahoval lyzimeter 15. Vyššie hodnoty dosahovali lyzimetre 1 a 19. Lyzimeter 19 dokonca v niektorých dňoch dosiahol vyššie hodnoty ako lyzimeter 1. Napríklad 2. a 3. apríla. Potom bol sneh na tomto bode úplne roztopený. V nasledujúcich dňoch bod 1 dosahoval výrazne vyššie hodnoty ako bod 15. Potom však došlo k úplnému roztopeniu bodu 1, avšak sneh na bode 15 trval ešte niekoľko dní potom. Tieto rozdiely sú pravdepodobne spôsobené rozličným príkonom slnečného žiarenia. Bod číslo 15 sa nachádzal v relatívne hustom lese s výškou porastu aj nad 2 metre, bol teda najviac chránený voči slnečnému žiareniu. Bod 1 sa nachádzal vo veľmi nízkom poraste mladých smrekov do 1 metra, zatienenie bolo teda v tejto lokalite nižšie. Bod číslo 19 sa nachádzal na takmer voľnej ploche. Rozdiely boli aj v orientácii voči svetovým stranám.

K podobným výsledkom sme dospeli aj na základe výpočtu DDF z meraní VHS. V dňoch 31. marca a 7. apríla bola meraná VHS. Medzi týmito dvoma termínmi neboli zaznamenané žiadne výraznejšie zrážky, preto bolo možné vyčíslit' priemerné DDF. Bohužiaľ, niekoľko lokalít bolo už na začiatku tohto obdobia bez snehu alebo sa na nich sneh úplne roztopil pred 7. aprílom. Na lokalitách 23, 24, 26 sa sneh roztopil práve 7. apríla. Čas úplného roztopenia sme získavali pomocou prízemných teplomerov popísaných v kapitole *Materiál a Metódy*. Vhodných bodov pre analýzu bolo 10 (body číslo 3, 12, 14, 15, 16, 20, 23, 24, 26, 27). Ich priestorové rozloženie je zobrazené na obr. 3. Priemerná teplota vzduchu za týchto 7 dní dosiahla 6,58 °C. Z nej vychádzali aj výpočty DDF. Najvyšších hodnôt dosahovali lokality na voľnej ploche a najnižšie lokality v lese. Absolútne najvyššou bola hodnota 7,9 mm deň⁻¹°C⁻¹ na bode 23. Tu sa roztopilo viac ako 357 mm za 7 dní (tab.1). Podobne na tom bola aj lokalita 26. Naopak najnižšia hodnota bola na 14, a to iba 2,1 mm deň⁻¹°C⁻¹. Hodnoty menej ako tri dosahovali všetky lesné lokality (obr. 3, tab. 1)

Tabuľka 1. Teplotný faktor na vybraných bodoch

Číslo tyče	31. Mar. 2016		7. Apr. 2016		Rozdiel VHS [mm]	DDF [mm deň ⁻¹ °C ⁻¹]
	Výška snehu [cm]	VHS [mm]	Výška snehu [cm]	VHS [mm]		
3	82	339.4	30.0	125.5	213.9	4.6
12	61	203.3	22.0	75.7	127.7	2.8
14	49	178.2	21.0	82.4	95.8	2.1
15	61	221.5	23.0	100.0	121.5	2.6
16	48	183.3	19.0	74.0	109.3	2.4
20	62	200.8	22.0	79.2	121.6	2.6
23	84	357.8	0.0	0.0	357.8	7.9
24	50	189.0	0.0	0.0	189.0	4.1
26	71	294.3	0.0	0.0	294.3	6.4
27	70	265.1	20.0	88.9	176.2	3.8



Obr. 3. Teplotný faktor v povodí Sokolný jarok. Veľkosť symbolu predstavuje hodnotu teplotného faktoru.

Diskusia a Záver

Hodnoty DDF získané v tejto práci sú v súlade s rozsahmi hodnôt uvádzanými v Kuusisto (1980), Hock (2003), Holko et al. (2012). Zaujímavé sú však rozdiely medzi nimi, ktoré dosiahli hodnotu až viac ako $5 \text{ mm day}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Tento rozdiel bol spôsobený pravdepodobne rozdielmi v lokalizácii výskumných bodov voči vegetácii, ktorá tvorí prekážku slnečnému žiareniu. V neposlednom rade tu určite zohrávala úlohu aj orientácia voči svetovým stranám. V budúcnosti by bolo potrebné vytvoriť presný model terénu spojený s vegetačnou pokrývkou. Následne by tento povrch vstupoval do analýzy potencionálneho slnečného žiarenia, ktorá by pomohla ozrejmiť vzťah žiarenia s DDF. V prípade energeticky založeného modelu topenia snehu by hodnoty z lyzimetrov mohli slúžiť ako cenný zdroj údajov na jeho validáciu.

Nevýhodou snehových lyzimetrov je to, že nie je možné kontrolovať jeho funkčnosť počas obdobia, keď je pokrytý snehovou pokrývkou.

Táto práca bola primárne zameraná na popis časového priebehu a priestorových rozdielov v topení snehu počas zimnej sezóny 2015/2016 v mikropovodí Sokolného

jarku v Západných Tatrách. Veľká variabilita sa prejavila na rozdieloch v intenzitách topenia v rôznych častiach povodia. Tieto rozdiely sú natoľko výrazné že je potrebné ich zohľadniť aj pri zrážkovo-odtokovom modelovaní. Asimilácii získaných údajov do distribuovaných modelov sa budeme venovať v budúcnosti.

Literatúra

Bocchiola, D., Mihalcea, C., Diolaiuti, G., Mosconi, B., Smiraglia, C., Rosso, R., 2010. Flow prediction in high altitude ungauged catchments: a case study in the Italian Alps (Pantano Basin, Adamello Group) Adv. Water Resour, 33 , pp. 1224-1234

Debele, B., Srinivasan, R., Gosain A., 2010. Comparison of process-based and temperature-index snowmelt modeling in SWAT Water Resour. Manag., 24 , pp. 1065-1088

DeWalle, D.R., Henderson, Z., Rango, A., 2002. 'Spatial and temporal variations in snowmelt degree-day factors computed from SNOTEL data in the Upper Grange Basin' Proceedings of the 70th Western Snow Conference, Granby CO, 73-81

Hamlin, L. Pietroniro, A. Prowse T., Soulis, R. Kouwen N. 1998 Application of indexed snowmelt algorithms in a northern wetland regime

Hydrol Process, 12 (), pp. 1641-1657

Hock, R. 1999. A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation, Journal of Glaciology 45(149), 101-111

Hock, R. 2003. Temperature index melt modelling in mountain Areas. J. Hydrol., 282 (1-4), 104-115

Holko, L., Danko, M., Kostka, Z., 2012. Klasifikácia zím, hustota nového snehu a teplotný faktor topenia snehovej pokrývky v povodí Jaloveckého potoka. In Acta Hydrologica Slovaca, roč. 13, č. 2, s. 342-349.

Holko, L., Danko, M., Kostka, Z., Liová, S., 2013. Vývoj odtoku v riečnej sieti horského povodia počas topenia snehu. In Acta Hydrologica Slovaca, roč. 14, č. 2,

2013, 372 - 379

Krajčí, P., Danko, M., Hlavčo, J., Kostka, Z., Holko, L., 2016. Experimental measurements for improved understanding and simulation of snowmelt events in the Western Tatra Mountains. *J. Hydrol. Hydromech.*, Vol. 64, No. 4 Early View, 2016, p.13 , doi: 10.1515/johh-2016-0038

Kuusisto, E. 1980. On the values and variability of degree-day melting factor in Finland. *Nord. Hydrol.*,11(5), 235-242.

Martinec, J., 1960. The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting. *IAHS Publ.* 51, 145-154.

Ohmura, A.,2001. Physical basis for the temperature-based melt-index method *J Appl Meteorol*, 40 , pp. 753-761

Penna D., Ahmad M., Birks S. J., Bouchaou L., Brenčič M., Butt S., Holko L., Jeelani G., Martínez D. E., Melikadze G., Shanley J. B., Sokratov S. A., Stadnyk T., Sugimoto A., and Vreča P. (2014), A new method of snowmelt sampling for water stable isotopes, *Hydrol. Process.*, 28, pages 5367-5644, doi: [10.1002/hyp.10273](https://doi.org/10.1002/hyp.10273)

Pomeroy, J.W., E., Brun., 2001. "Physical properties of snow" In, (eds. H.G. Jones, J.W. Pomeroy, D.A. Walker and R.W. Hoham) *Snow Ecology: an Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK., 45 - 118.

Singh,P., Kumar,N., Arora, M., 2000. Degree-day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas, *Journal of Hydrology*, Volume 235, Issues 1-2, 22 Pages 1-11, ISSN 0022-1694, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00249-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00249-3).