

# VPLYV PREDPOKLADANEJ KLIMATICKEJ ZMENY NA VÝVOJ ZÁSOB VODY V SNEHOVEJ POKRÝVKE NA PRÍKLADE ZÁPADNÝCH TATIER

Matúš Hríbik • Jaroslav Škvarenina

## Úvod a problematika

V orograficky členitých podmienkach Slovenska má sneh a snehová pokrývka veľký klimatický, ekologický, environmentálny ako aj vodohospodársky a lesnícky význam. Sneh chráni poľnohospodárske plodiny a lesné rastliny pred holomrazmi a tiež je nenahraditeľným zdrojom zásob pôdnej vlhky. Rovnako pozitívne ju ohodnotia milovníci a vyznávači zimných športov ako aj ľudia zamestnaní v cestovnom ruchu.

Na pozadí nebezpečenstva toxických imisíí a na sklonku 20. storočia začal vo vedeckých kruhoch objavovať fenomén človekom podmienenej zmeny klímy. Vedci dôrazne upozorňovali na spojitost rastu koncentrácií radiačne aktívnych plynných emisíí (skleníkových plynov) a tepelnej bilancie našej planéty. To čo sa spočiatku javilo len ako teória klimatológov sa postupom rokov začalo črtat vo svetle environmentálnej hrozby.

Pohľady na globálne klimatickú zmenu, na jej rýchlosť, vplyv a mieru zavinenia človekom sa často rôznia, inokedy sú celkom protichodné. Je však nesporné že sa stala realitou a my sme jej súčasťou. Stále však existuje skupina vedcov, ktorá popiera zodpovednosť človeka a zmenu klímy pripisuje dlhodobej oscilácii a kulminácii.

Avšak, správa, ktorá bola zverejnená v Paríži vo februári 2007, doplnená v apríli 2007 a bola zostavená odborníkmi z Medzivládneho panelu pre klimatickú zmenu (IPCC) dlhodobo študujúcimi vývoj klímy, hovorí, až o 90-percentnej istote, že človek spôsobuje globálne otepľovanie. Tón dokumentu je v porovnaní s poslednou správou z roku 2001 varovnejší. Podľa klimatológov je totiž výrazne zrejmejšia zodpovednosť človeka za globálne otepľovanie. Po šesťročnej práci vedci dospeli k záveru, že priemerná teplota na Zemi sa môže do konca tohto storočia zvýšiť najpravdepodobnejšie od 1,8 až do 4 stupňov Celzia (krajný scenár hovorí o zvýšení až o 6,4 stupňa). Na štúdiu sa podieľalo 3 750 klimatických odborníkov, združených v Medzivládnom paneli pre zmenu klímy. Otepľovanie klimatického systému je podľa správy nepochybné. Svedčí o tom vývoj priemerných teplôt ovzdušia i oceánov, pokračujúce topenie ľadovcov, najmä na pólach, aj rastúca priemerná úroveň hladiny oceánov. Autori dokumentu pripomínajú, že jedenásť z posledných dvanástich rokov figuruje na rebríčku najteplejších od roku 1850, keď sa o tom začali viesť záznamy. Od obdobia 1850–1899 do 2001–2005 teploty vzrástli v priemere o 0,76 stupňa Celzia. V priebehu 20. storočia stúpila podľa odhadu IPCC hladina morí asi o 17 cm. Tento rast by mal pokračovať v 21. storočí o ďalších 18 až 59 centimetrov.

Podľa niektorých autorov (správa IPCC) môže byť jedným z markantných znakov globálnej zmeny klímy úplný, resp. rozsiahly zánik snehovej pokrývky. Podľa iných scenárov zmien klímy sa dokonca aj pre podmienky horských a alpínskych spoločenstiev očakávajú zmeny v kvantite, časovom a priestorovom rozložení snehu. Snehová pokrývka, ak sa aj zachová, pravdepodobne bude vo svojom zredukovanom objeme obsahovať nebezpečné koncentrácie toxických prímiesí. Na procesy zániku niválnych (snežných) pásiem sa pravdepodobne logicky naviažu ďalšie environmentálne problémy (napríklad: pokles vodohospodárskych a pôdochranných funkcií horských a kosodrevinových lesov, migrácia organizmov, zmeny v biodiverzite spoločenstiev a iné...). Reálne však zmena klímy môže paradoxne priniesť v vyšších horských a vysokohorských polohách dokonca markantný sezónny nárast množstva snehu (napríklad ak vychádzame z analógie mediteránnych horstiev pri zmene cirkulačných pomerov). Prezentované výstupy z modelu WaSIM sú len jednou z alternatív možných zmien.

## Materiál a metódy

Cieľom našej práce bolo aj posúdenie zmien vodnej hodnoty snehovej pokrývky distribuovaným fyzikálne založeným zrážkovo odtokovým modelom WaSiM-ETH. V tomto článku sme sa zamerali na povodie Studeného potoka, keďže model, okrem iného môže byť využitý na vplyv klimatickej zmeny na priebeh odtokov v malých horských povodiach (SCHULLA 1997), (SCHULLA a JASPER 1999) a je schopný reprezentovať rýchlu hydrologickú odozvu typickú pre alpínske a subalpínske povodia (GRABS 1997).

Podrobný postup experimentu je uvedený na [www.homepage.hispeed.ch/wasim/index.html](http://www.homepage.hispeed.ch/wasim/index.html) a uvádza ho aj KOSTKA a HOLKO (2000). Pri simuláciách sme použili klimatické scenáre CCCMprep 1999 vypracované v rámci klimatického programu (LAPIN a MELO 2000) vyjadrujúce zmeny mesačných hodnôt klimatologických prvkov pre horizonty 2030 a 2075. Teplotu vzduchu sme prepočítali podľa scenárov platných pre celé územie Slovenska, zrážkové úhrny podľa scenára pre horské stanice v Západných Tatrách. Pri prepočte vstupných údajov sme použili mesačné scenáre. Pri simuláciách sme sa držali predpokladu, že nedôjde k zmene využitia krajiny (vegetačného krytu) ani k zmenám fyziologických vlastností rastlín. Tu by sme videli priestor pre ďalší výskum a bolo by potrebné brať ohľad na zmenu drevinového zloženia ako aj posun hornej hranice lesa podobne ako uvádza MINĐÁŠ a ŠKVARENINA (2003). Pre modelovanie vodnej hodnoty snehu sme využili výstupy z modelu WaSiM-ETH, (KOSTKA a HOLKO 2000), ktorý vygeneroval koeficienty zmeny pre rôzne nadmorské výšky ako pre rok 2030, tak aj pre rok 2075. Vychádzali sme z logickej analógie a predpokladali sme, že rovnako ako dnes sa budú vyskytovať zimy priemerné, bohatšie a chudobnejšie na snehovú pokrývku. Preto sme na naše namerané hodnoty použili tento princíp a vygenerovali sme zimy, ktoré sa budú vyskytovať pri zrážkovo podpriemerných, priemerných a aj nadpriemerných zimách v rokoch 2030 a 2075.

### **Charakteristika prírodných pomerov Západných Tatier (sever)**

Pre územie Západných Tatier ako výskumného územia sme sa rozhodli hlavne kvôli jeho pomerne severnému situovaniu, jeho masívnosti a vysokej priemernej nadmorskej výške.

Kryštalinická časť Západných Tatier je po geologickej stránke založená z granitoidných hornín, z kryštalických bridlic, z migmatitov a z viacerých tektonických derivátov týchto hornín. Najstarším elementom sú kryštalické bridlice, medzi ktorými prevládajú dvojsľudové pararuly, kvarcity, kvarcité ruly a amfiboly. Ich uloženie ovplyvňuje morfológiu územia. Všetky tieto horniny majú rozdielnu geomorfologickú hodnotu, ktorá sa výrazne uplatnila pri konečnom stvárňovaní reliéfu Západných Tatier nielen činnosťou ľadovca ale aj tečúcou vodou, kryogénnymi procesmi, snehom i krasovými procesmi (MIDRIAK 1983). Podľa Atlasu krajiny (KOLEKTÍV 2002) a podľa (MAHELA 1986) je oblasť Zverovka – Spálené budovaná prevažne granodioritami, reliéf je glaciálno-hôľny až glaciálny.

Na horninách kryštalinika, ktorého plocha v západných Tatrách prevláda, je výrazná výšková pôdna pásmovitosť. Najviac zastúpené v subalpínskom stupni nad hranicou lesa sú podzoly. V alpínskom stupni prevládajú mačínové humusovo-železité podzoly, mačínové pôdy typické i hnedé a napokon primárne (surové) pôdy v začiatočnom štádiu vývoja. Okrem uvedených pôd sú v Západných Tatrách typickým komponentom povrchu nad hranicou lesa sutiny, ktoré sú zväčša retenčne veľmi účinné a zaberajú dosť značnú rozlohu nielen v alpínskom, ale aj v subalpínskom stupni (MIDRIAK 1983). Podobne ako v celej oblasti Západných Tatier i v oblasti Zverovka – Spálená prevládajú podzoly modálne (KOLEKTÍV 2002).

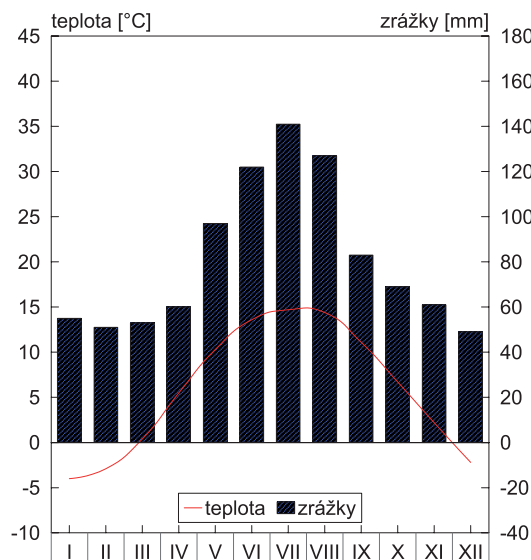
Klímu Západných Tatier súhrnne charakterizujú tabuľka 1 a obrázok 1. Sledované a v práci vyhodnotené povodie Studeného potoka po horáreň Brestová predstavuje plochu 35,6 km<sup>2</sup>.

Tabuľka 1 Klimatické charakteristiky v Západných Tatrách

TANAP – Západné Tatry	
Priem. ročná teplota	0,4–4,6 °C
Priem. júlová teplota	8,7–13,9 °C
Počet dní s teplotou vyššou ako 0 °C	188–240 dní
Počet dní s teplotou vyššou ako 5 °C	116–177 dní
Počet dní s teplotou vyššou ako 10 °C	0–111 dní
Priemerný ročný úhrn zrážok	1 200–1 810 mm
Priemerný úhrn zrážok letného polroku (apríl-september)	690–1 040 mm
Priem. trvanie snehovej pokrývky	178–241 dní
Klimatická oblasť, okrskok (podľa LAPINA a kol. ex. Atlas krajiny SR 2002)	(C) Chladná oblasť, okrsky: – (C2) chladný horský; – (C3) studený horský
Klimageografický typ, subtyp (podľa TARÁBKA ex Atlas SSR)	Horská klíma; subtypy klímy: – studená; – veľmi studená
Reprezentujúci Walterov klimadiagram	Zuberec 763 m n. m. Zverovka 1 027 m n. m.

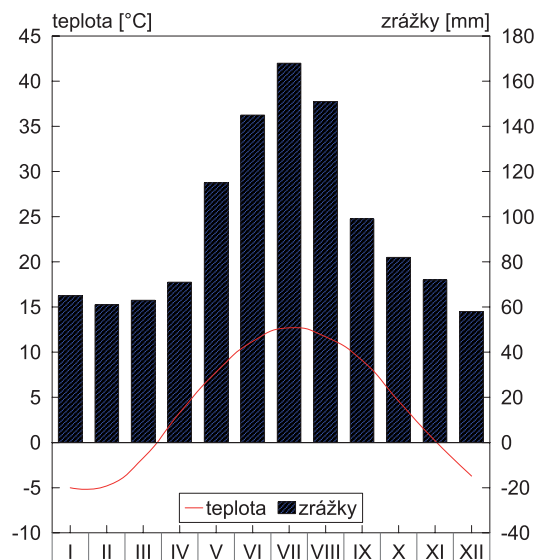
### Zuberec 763 m n. m.

Priemerná roč. teplota = 5.8 °C Priemerný roč. úhrn zrážok = 968 mm



### Zverovka 1027 m n. m.

Priemerná roč. teplota = 3.7 °C Priemerný roč. úhrn zrážok = 1150 mm



Obrázok 1 Reprezentatívne klimadiagramy pre sledované územie TANAP – Západné Tatry, lokality Zuberec 763 m n. m., Zverovka 1 027 m n. m.



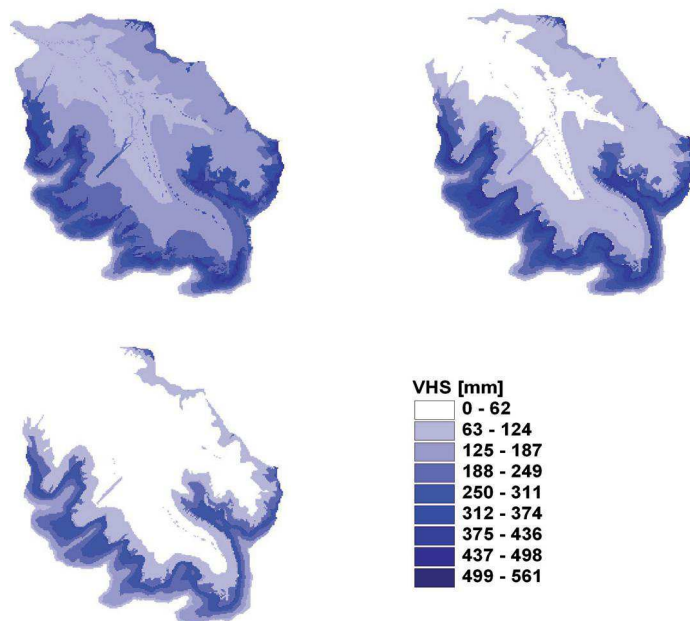
Obrázok 2 Digitálny model terénu pre sledované územie Západné Tatry – povodie Studeného potoka po horáreň Brestová (35,6 km<sup>2</sup>)

Lesnatosť v Tatrách predstavuje 94,6 % a s ochranným pásmom 73 % (TANAP) (ZELENÁ SPRÁVA 2007). Z hľadiska vertikálnej stupňovitosti vegetácie možno v Západných Tatrách zaradiť plochu lesa nad 1 000 m izohypsou do smrekovo-bukovo-jedľového, smrekového a kosodrevinového stupňa. Najväčšie plošné zastúpenie z lesných typov má skupina jedľových smrečín. Priemerná výška súčasnej hornej hranice zapojeného lesa v slovenskej časti Západných Tatier je len 1 380 m n. m., výška hornej hranice lesa, vrátane medzernatých (rozpojených) porastov, je 1 478 m n. m. MIDRIAK (1983) a SOMORA (1967, 1973) udáva priemernú výšku súčasnej hranice lesa na svahoch v 1 560 m n. m. Nad hranicou lesa sú typickým komponentom vegetácie kosodrevinové, najmä však hôľne bylenné porasty.

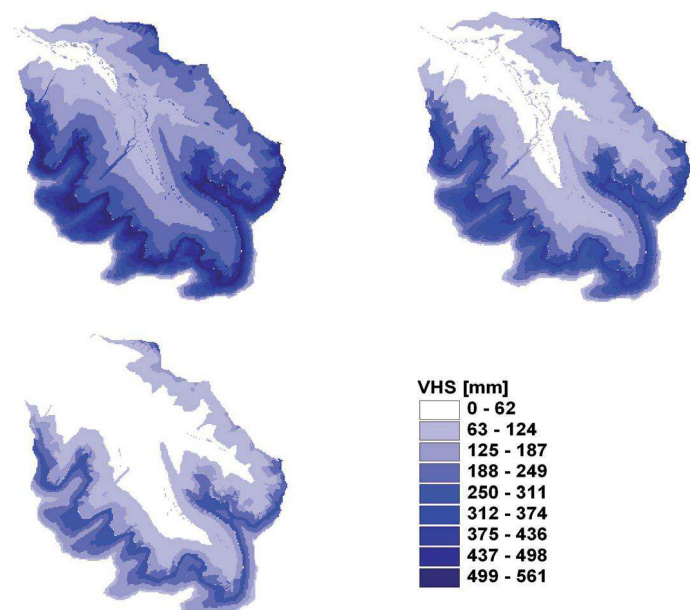
Rozsah lavínových plôch v Západných Tatrách je najvyšší zo všetkých vysokých pohorí. V slovenskej časti pohoria predstavuje 4 490 ha (KŇAZOVICKÝ 1970). Podrobnejšie charakterizujú Západné Tatry práce KŇAZOVICKÉHO (1967, 1970) a MIDRIAKA (1983).

## Výsledky a diskusia

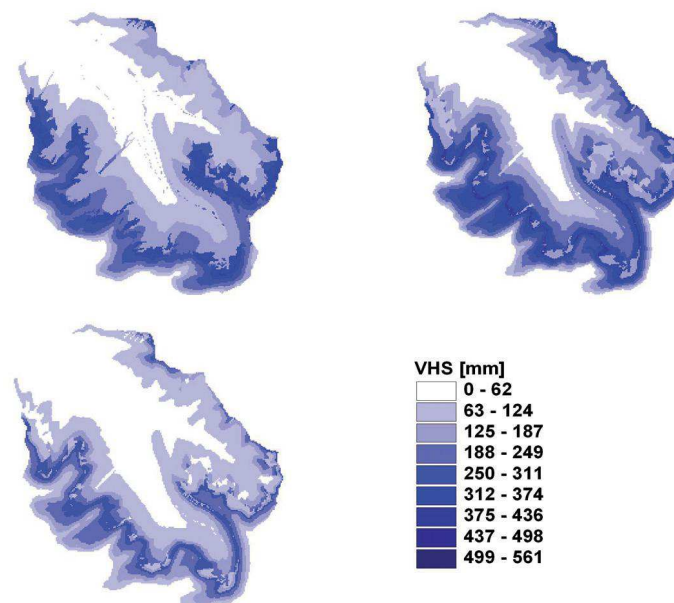
Výsledky vodnej hodnoty snehu pre referenčné obdobie, rok 2030 a rok 2075 z povodia Studeného potoka, pre snehovo priemernú zimu sú znázornené na obrázku 3, výsledky zo snehovo nadpriemernej zimy na obrázku 4 a výsledky zo snehovo podpriemernej zimnej sezóny sú podané na obrázku 5.



Obrázok 3 Vodná hodnota snehu (VHS v mm) vo vrchole priemernej zimy v referenčnom období – rok 2006, a pre scenár klimatickej zmeny (CCCM) pre roky 2030 a 2075 v povodí Studeného potoka

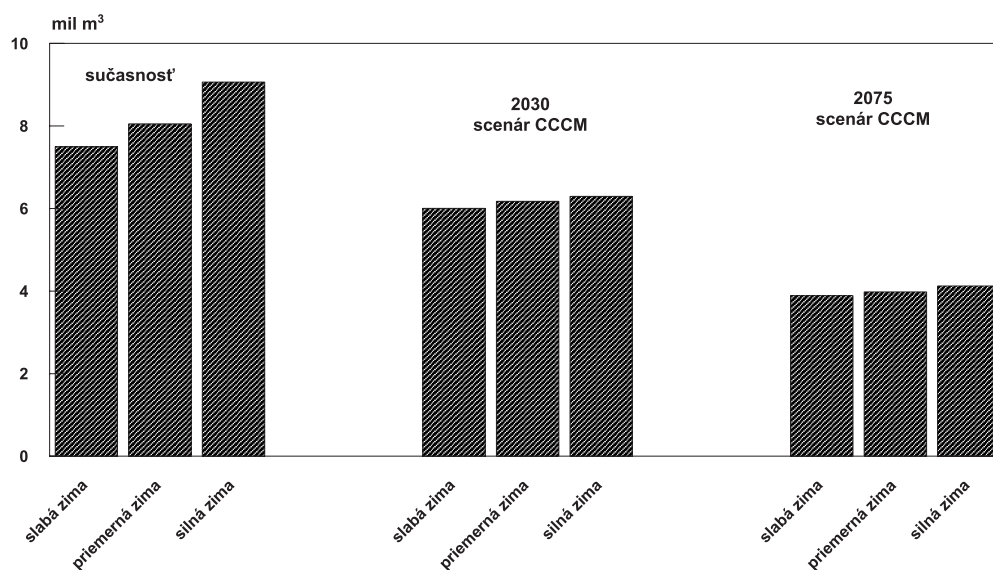


Obrázok 4 Vodná hodnota snehu (VHS v mm) vo vrchole nadpriemernej zimy v referenčnom období – rok 2005, a pre scenár klimatickej zmeny (CCCM) pre roky 2030 a 2075 v povodí Studeného potoka



Obrázok 5 Vodná hodnota snehu (VHS v mm) vo vrchole podpriemernej zimy v referenčnom období – rok 2008, a pre scenár klimatickej zmeny (CCCM) pre roky 2030 a 2075 v povodí Studeného potoka

Modelovanie ukázalo, že zmena základných klimatických parametrov (teplota vzduchu a zrážky) vyvolá zníženie vodnej hodnoty snehu a vodných zásob v tokoch. Obrázok 6 toto zníženie dokumentuje a vyplýva z neho jasný trend znižovania vodných zásob v snehovej pokrývke.



Obrázok 6 Zásoba vody viazanej v snehu (v miliónoch m<sup>3</sup>) vo vrcholoch podpriemerných, priemerných a nadpriemerných zím v referenčnom období, a pre scenár klimatickej zmeny (CCCM) pre roky 2030 a 2075, v povodí Studeného potoka (plocha povodia je 35,6 km<sup>2</sup>)

V povodí Studeného potoka bude v roku 2030, rozdiel od referenčného obdobia priemernej zimy 1,8 mil. m<sup>3</sup> (77 % z referenčného obdobia) a v roku 2075 3,93 mil. m<sup>3</sup> (49 % z referenčného obdobia). Zo zisteného vyplýva, že klimatická zmena sa najviac dotkne územia s nižšou priemernou výškou. Z tohto hľadiska sú najviac ohrozené smrečiny rastúce na okraji a za limitom ich ekologického optima.

Výsledky hydrologických simulácií s využitím prostriedkov GIS v povodí Studeného potoka poukazujú na výrazné zmeny hydrologického režimu v dôsledku spôsobenia klimatickej zmeny. Na tomto mieste je však potrebné opäť upozorniť, že výsledky nemožno interpretovať ako zmeny, ktoré nastanú v časových horizontoch 2030 a 2075. Aby sa výsledky našej práce, ktorá vychádza z údajov meraných v rokoch 2005–2008 (nie v referenčnom období 1951–1980) dali porovnávať s inými prácami venovanými obdobnej problematike, bolo by potrebné po-

užiť scenáre, ktoré by vyjadrovali zmenu klimatických prvkov pre dané časové horizonty vzhľadom na obdobie 2004–2008. Hoci názory na to, či dôjde alebo už dokonca dochádza ku klimatickej zmene stále nie sú jednotné, zvyšovanie teploty vzduchu je skutočnosťou. Postup, ktorý sme použili v tejto práci je porovnateľný s postupmi v iných krajinách. Výhodou matematického modelu založeného na fyzikálnych vzťahoch medzi klimatickými prvkami a priebehom hydrologických procesov je, že by mal poskytovať reálne výsledky aj pre očakávané zmenené vstupné údaje. Z tohto hľadiska ďalší vývoj v tejto oblasti závisí najmä od ďalšieho upresňovania odhadov zmien klimatických prvkov pre jednotlivé časové horizonty. V súvislosti so zmenou klímy sa často hovorí o pravdepodobnosti zvyšovania početnosti extrémnych hydrologických javov ako sú povodne a suchá. Takéto názory sú založené na logických úvahách. Klimatické scenáre predpokladajú mierne zvýšenie zrážkových úhrnov pri súčasnom zvýšení počtu oblačných dní (KLEMENTOVÁ a BLAHA 2000). Z toho sa dá usudzovať, že sa zvýši počet väčších zrážkových a teda aj odtokových udalostí. Zvyšovanie teploty vzduchu by logicky malo pri iba miernom zvýšení zrážkových úhrnov zvýšiť evapotranspiráciu a teda aj výskyt suchých období. Tieto úvahy však nemusia byť pravdivé. Okrem toho, že neuvažujú napríklad s možnými zmenami vo vegetačnej pokrývke, na ich overenie by bolo potrebné pracovať s dennými scenármi pre vstupné údaje – potom by na základe simulácií kalibrovaných fyzikálne založeným modelom bolo možné vyhodnotiť aj výskyt extrémnych hydrologických javov. Pri upresňovaní odhadov v budúcnosti bude tiež dôležité, ako dokážeme implementovať iné vplyvy, napríklad vplyv zmenej vegetácie (MINDÁŠ a ŠKVARENINA 1996) alebo pôdnej pokrývky (ŠÁLY 1996).

V rámci širšej diskusie ohľadom zmeny klímy sa môžeme stotožniť so závermi práce FAŠKO *a kol.* (2008). Konštatujú, že na väčšine územia Slovenska je v súčasnosti charakteristická nevyváženosť výskytu snehovej pokrývky a to časová, ale prejavuje sa aj v absolútnych hodnotách snehovej pokrývky, resp. jej vodnej hodnoty. Okrem toho pre Slovensko s jeho zložitými prírodnými podmienkami, ako o tom vypovedá aj predkladaná práca, bola vždy typická priestorová premenlivosť väčšiny hodnôt meteorologických prvkov a ich charakteristík, atmosférické zrážky a snehovú pokrývku nevnímajú.

## Záver

Globálne klimatické zmeny predstavujú jeden z najväčších globálnych problémov našej planéty. Hrozba extrémnych javov, extrémne rýchleho oteplenia, zmena distribúcie zrážok ako aj cirkulačných pomerov môžu mať nedozierne následky nielen na jednotlivé ekonomické sektory nášho života ale aj na stav a zachovanie funkčného prírodného prostredia. Zánik, resp. úplná absencia snehovej pokrývky bude mať vážne dôsledky na vodohospodárske poslanie horskej krajiny. Modelové simulácie predpokladajú rozsiahle zmeny pretokov a stability horských tokov. Zmeny nastanú aj v kvalitatívnych parametroch vody, obsahoch dusičnanov a rizikových prvkov.

Zmena klímy je spájaná aj s fenoménom nárastu prírodných rizík (víchrice, privalové dažde, povodne, sucho, požiare, lavíny). S problematikou zmien snehovej pokrývky úzko korešpondujú hlavne jarné povodne a lavíny. Poznatky zistené v tomto výskumnom projekte sú využiteľné aj v povodňovom varovnom systéme Slovenského hydrometeorologického ústavu, tiež v práci strediska lavínovej prevencie. V nemalej miere sú výsledky tykajúce sa zmien vodnej hodnoty širšie aplikovateľné aj pri hodnotení sucha a vlhovej bilancie krajiny aj s ohľadom na možnú gradáciu podkôrneho hmyzu.

## Podakovanie

Autori ďakujú za podporu grantovej agentúre VEGA MŠ SR projekty č. 1/0515/08, 1/4393/07.

## Literatúra

- FAŠKO P., PECHO J., HRÍBIK M., ŠKVARENINA J., 2008: Zmeny snehových pomerov na Slovensku, XVI. posterový deň s medzinárodnou účasťou, ÚH SAV Bratislava (v tlači).
- GRABS W., 1997: Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. Int. Conf. for the Hydrology of the Rhine Basin (CRH), CHR report no. I-16, Lelystad, 172 p.
- Dostupné na internete: <http://www.land.gov.sk/index>, Zelená Správa 2007
- KLEMENTOVÁ E., BLAHA J., 2000: Zrážky – základný klimatický parameter prírodných pomerov Slovenska. VIII. posterový deň s medzinárodnou účasťou, ÚH SAV Bratislava, 16. 11. 2000

- KŇAZOVICKÝ L., 1967: Lavíny. Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 1967, 264 s.
- KŇAZOVICKÝ L., 1970: Západné Tatry, Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 1970, 216 s.
- KOLEKTÍV, 2002: Atlas krajiny Slovenskej republiky. MŽP SR, 2002, 342 s.
- KOSTKA Z., HOLKO L., 2000: Vplyv klimatickej zmeny na priebehu odtoku v malom horskom povodí. NKP SR 8, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 2000, s. 91-109.
- LAPIN M., MELO M., 2000: Stručný prehľad scenárov klimatickej zmeny pre Slovensko. Katedra meteorológie a klimatológie MFF UK, Bratislava
- MAHEL M., 1986: Geologická stavba čs. Karpát, Veda Bratislava, 479 s.
- MIDRIAK R., 1983: Morfogenéza povrchu vysokých pohorí, VEDA, Bratislava, 516 s.
- MIŇDÁŠ J., ŠKVARENINA J. (eds.), 2003: Lesy Slovenska a globálne klimatické zmeny. Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2003, 129 s.
- SCHULLA J., 1997: Hydrologische modellierung von Fluss Gebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften, Heft 69, ETH Zürich, 161 s.
- SCHULLA J., JASPER K., 1999: Model description WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model ETH). Institute of Geography ETH, Zürich, 166 s.
- SOMORA J., 1967: Vegetačný kryt TANAPu. *In* Koncepcia Tanapu, Bratislava, Obzor, s. 31–71,
- SOMORA J., 1973: Vysokohorské pôdochranné zalesňovanie na príklade TANAPu. *In* O vysokohor. pôdochr. zalesňovaní, Žilina, DT SVTS, s. 59–65.
- ŠÁLY R., 1978: Pôda, základ lesnej produkcie. Príroda, Bratislava, 1978, 240 s.

**Adresy autorov:**

**Ing. Matúš HRIBÍK, PhD., prof. Ing. Jaroslav ŠKVARENINA, CSc.**

*Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, 960 53 Zvolen, e-mail: vrchar@gmail.com; jarosk@vsl.d.tuzvo.sk*