VÝZKUM PROCESŮ AKUMULACE A TÁNÍ SNĚHU V KRUŠNÝCH HORÁCH

Alice Taufmannová [1], Michal Jeníček[1], Dana Kučerová[1], Hana Pevná[1], Slávek Podzimek[1]

Abstrakt

Pro výzkum a modelování procesů akumulace a tání sněhu je klíčová znalost množství vody akumulované ve sněhové pokrývce. Určení tohoto množství není ovšem s ohledem na prostorovou variabilitu charakteristik sněhové pokrývky vůbec jednoduché. Údaje o sněhové pokrývce ze staničních měření se zejména v horském terénu mohou výrazně lišit od skutečných podmínek, které panují v povodí i v nejbližším okolí stanice. Cílem příspěvku je shrnutí dosavadních výsledků výzkumů v oblasti sněhové hydrologie prováděných na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK v horských povodích v Krušných horách. Hlavní výsledky se týkají především metodiky terénního monitoringu sněhové pokrývky, metod výpočtu prostorového rozložení sněhu a modelování akumulace a tání sněhu na vybraných povodích. Od roku 2008 probíhá v povodích Bystřice a Zlatého potoka monitoring klimatologických a hydrologických veličin a také monitoring výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu. Poznatky získané terénním průzkumem a následnou analýzou v GIS byly použity při modelování akumulace a tání sněhu pomocí srážko-odtokového modelu HEC-HMS a metody Temperature Index. Výsledky potvrdily původní předpoklady, že podrobný monitoring může přinést zpřesnění parametrů hydrologických modelů a následně umožní přesnější simulace akumulace a tání sněhu.

Klíčová slova: hydrologické modelování, akumulace a tání sněhové pokrývky, HEC-HMS, teplotní index, interpolační metody

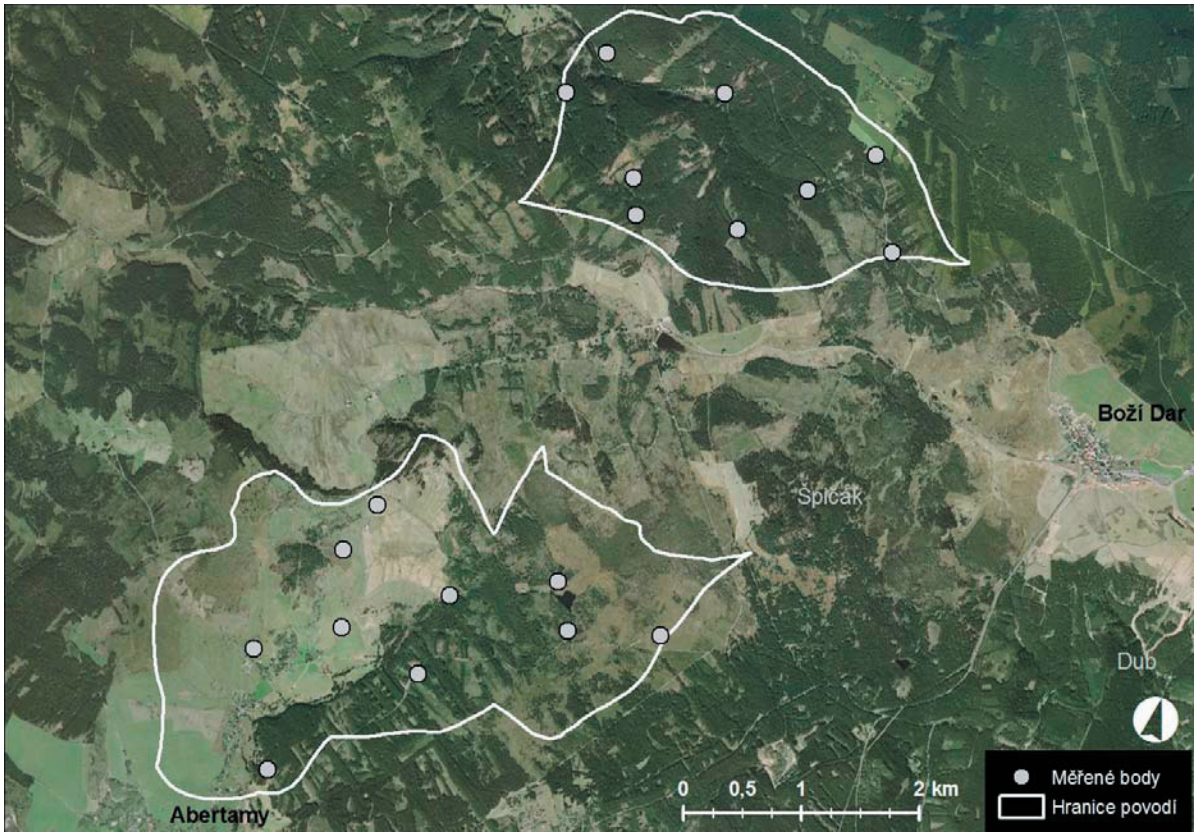
1. Úvod

Tání sněhu vlivem zvýšené teploty, doprovázené dešťovými srážkami, představuje v České republice častou příčinu vzniku povodně. Předpověď povodní z tání sněhu představuje složitý úkol, kterému je v současnosti věnováno stále více pozornosti. Problematikou modelování akumulace a tání sněhové pokrývky se zabývalo množství domácích i zahraničních autorů [1], [2], [3], [4], [5], [12]. Pro operativní hydrologické modelování je zásadní znalost množství sněhu v povodí a jeho prostorová distribuce zejména ve smyslu změny s nadmořskou výškou a krajinným pokryvem. Problematikou hydrologického modelování z tajícího sněhu, ale i akumulací sněhové pokrývky v různých fyzickogeograficky heterogenních prostředích se zabývá v České republice vedle oborově hlavní instituce Českého hydrometeorologického ústavu i další pracoviště výzkumného zaměření v čele s univerzitami. Od roku 2006 se tématem tání a akumulace sněhové pokrývky a odtokem ze sněhu zabývá i katedra fyzické geografie a geoekologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze.

Na katedře fyzické geografie a geoekologie začal pravidelný výzkum sněhové pokrývky z dat naměřených v terénu v zimní sezóně 2006/07 [6], [7], [13]. Od této sezóny jsou charakteristiky sněhové pokrývky sledovány několikrát během zimy na zvolených experimentálních povodí na Šumavě a v Krušných horách. Průběžně je monitorována výška sněhové pokrývky a vodní hodnota sněhu válcovým sněhoměrem s průřezem 50 cm^2. Do terénních měření jsou začleňováni studenti, kteří zpracovávají problematiku hydrologie sněhu ve svých bakalářských, magisterských a disertačních pracích. Monitoring sněhové pokrývky je intenzivněji prováděn v době tání ve snaze zachytit vztah tání a množství vody v závěrových profilech experimentálních toků, na nichž byly katedrou instalovány hladinoměry. Součástí monitoringu charakteristik sněhové pokrývky je i měření průtoků v profilech, kde se nacházejí hladinoměry.

V posledních dvou letech je největší pozornost věnována výzkumu v experimentálních povodích horní Bystřice a Zlatého potoka v Krušných horách. Tým pracovníků a studentů katedry se zabývá problematikou vlivu fyzickogeografického prostředí na akumulaci, distribuci a tání sněhu, modelováním odtoku ze sněhové pokrývky či problematikou vstupních dat o sněhové pokrývce do srážko-odtokových modelů. Cíle výzkumu sněhové pokrývky na katedře lze shrnout do následujících bodů:

- Zhodnocení vybraných fyzickogeografických faktorů na dynamiku akumulace a tání sněhu (nadmořská výška, vítr, vegetace, sklon, expozice)
- Vývoj metodiky měření a prostorové interpretace dat o sněhu pomocí pozemních metod a DPZ
- Modelování akumulace a tání sněhu v experimentálních povodích katedry, kombinace různých přístupů (Degree-Day, Energy Balance), tvorba scénářů odtoku z tajícího sněhu
- Problematika vstupních dat o sněhové pokrývce do srážko-odtokových modelů (interpolační metody)



Obr. 1: Poloha experimentálních povodí horní Bystřice (na jihu) a Zlatého potoka (na severu) s vyznačenými měřenými body

V Krušných horách je sněhová pokrývka sledována na celém povodí Bystřice po závěrový profil Ostrov (127,6 km^2), zvlášť pak v její horní části uzavřené profilem Abertamy (9,0 km^2) a na Zlatém potoce (5,5 km^2). Obě povodí patří mezi nejvýše položená povodí v Krušných horách a je zde předpoklad velkých zásob vody ve sněhové pokrývce a s tím související hrozby vzniku jarních povodní během náhlých oteplení. Horní Bystřice a Zlatý potok představují nejen dvě vegetačně odlišná povodí, ale liší se i orograficky, neboť se zde různě projevuje efekt návětří a závětří. Tato povodí byla vybrána za účelem srovnání odtoku vody z tajícího sněhu v odlišných fyzickogeografických prostředích. Polovinu území horní Bystřice tvoří nezalesněné otevřené plochy, naopak povodí Zlatého potoka je zalesněno celé (obr. 1).

2. Data a metody

2.1 Zdroje dat

Monitoring v Krušných horách začal v zimě 2008/2009, během něhož se vyvíjela metodika terénního měření, tak aby byla distribuce sněhu v povodí zachycena co nejreprezentativněji. Měření výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu není bodové, ale profilové, tzn. výška sněhové pokrývky je 10x měřena na 100 m profilu po cca 10 m, přičemž na 1., 5. a 10. bodě je měřena vodní hodnota sněhu. Profily byly určeny na hranici otevřené plochy a lesa, aby byly zohledněny rozdíly charakteristik sněhu u obou okrajových variant hustoty vegetace pro Krušné hory. Zároveň byly profily stanoveny na místa s typickou expozicí svahu a sklonitostí pro daný výškový stupeň po 100 m. Každý profil pak reprezentuje charakteristický bod pro danou nadmořskou výšku. Data získaná terénním měřením jsou převedena do prostorové reprezentace pomocí interpolačních metod v ArcGIS. Interpolace v prostředí ArcGIS vycházely z průměrné hodnoty měření pro daný profil. Volba vhodné interpolační metody je v současnosti samostatně řešeným tématem, které bude diskutováno níže. Naměřená data slouží jako vstup do srážko-odtokových modelů. Pomocí získaných dat pak probíhá kalibrace modelu. Zkalibrovaný model umožňuje následně modelování variantních simulací dynamiky akumulace a tání sněhové pokrývky.

Fyzikogeografický charakter území určuje rychlost a intenzitu tání na různých místech povodí. Nedílnou součástí sledování odtoku ze sněhové pokrývky je i monitoring hydrologických a klimatologických charakteristik území. Klimatologická stanice katedry na Hřebečné poskytuje údaje o úhrnu srážek, teplotě vzduchu a půdy, vlhkosti vzduchu, radiaci, směru a rychlosti větru a také o výšce sněhové pokrývky. Obě experimentální povodí jsou uzavřena automatickými hladinoměry s kontinuálním sledováním vodního stavu. Data získaná z vlastní pozorovací sítě jsou doplněna o data z měřicí sítě ČHMÚ, Povodí Ohře, s. p a Deutscher Wetterdienst (DWD). Pro hodnocení vlivu krajinného pokryvu na tání sněhové pokrývky byla použita databáze CORINE Land cover 2000 [8].

2.2 Metody

Ve všech řešených studiích probíhá modelování odtoku ze sněhu v prostředí srážko-odtokového modelu HEC-HMS. Pro zpracování prostorových dat bylo využito programu ArcGIS verze 9.3 firmy ESRI. Hydrologické charakteristiky povodí a vybrané fyzickogeografické charakteristiky povodí byly zjištěny z digitálního modelu terénu pomocí hydrologické extenze ArcHydro Tools. V prostředí HEC-HMS byl sestaven diskretizovaný model povodí a pro každé dílčí povodí byly odvozeny parametry charakterizující jejich strukturu a chování. Pro výpočet parametrů komponent srážko-odtokového procesu bylo použito standardních metod, které jsou v podobných studiích často aplikovány [9]. Pro výpočet objemu odtoku byla použita metoda SCS CN. Pro stanovení přímého odtoku byla zvolena metoda Clarkova jednotkového hydrogramu, podzemní odtok byl popsán metodou exponenciálního poklesu a pro výpočet postupu povodňové vlny v korytě byla vybrána metoda Muskingum-Cunge.

Zásadní problematikou související se snahou o co nejpřesnější simulaci odtoku vody ze sněhové pokrývky je správný popis prostorového rozložení sněhu na povodí pomocí interpolačních metod. V současnosti je k dispozici několik interpolačních metod, zdaleka ne všechny však mohou být použity na horská povodí. Využity byly interpolační metody v extenzi Geostatistical Analyst v ArcGIS, a to Thiessenovy polygony, IDW (Inverse Distance Weighting), GPI a LPI (Global a Local Polynomial Interpolation), RBF (Radial Basis Function), OK (Ordinary Kriging), Cokriging, ORO (orografická interpolace), RK (Residual Kriging). Jednotlivé metody byly srovnány pomocí křížové validace (Cross Validation).

Důležitou technikou použitou pro modelování odtoku ze sněhu v prostředí HEC-HMS je sněhový model a v jeho rámci metoda teplotního indexu (temperature index). Teplotní index (degree-day factor) počítá akumulaci a tání sněhové pokrývky na základě vstupních hodnot úhrnu srážek a teploty vzduchu. Teplotní index je definován jako denní úbytek vodní

hodnoty sněhu při zvýšení teploty vzduchu o jeden stupeň nad kritickou teplotu, při které začíná proces tání. Degree-day model je doplněn o výpočet zrání sněhové pokrývky, především zohlednění teplotního deficitu sněhu (Cold Content) a sezónní změny faktoru degree-day faktoru. Rozšířený model teplotního indexu zohledňuje pomocí dodatečných parametrů rozdíly v tání ve srážkovém i bezesrážkovém období a zjednodušeně počítá i výměnu tepla mezi sněhovou pokrývkou a zemským povrchem. Principy sněhového modelu jsou podrobně popsány v literatuře [10].

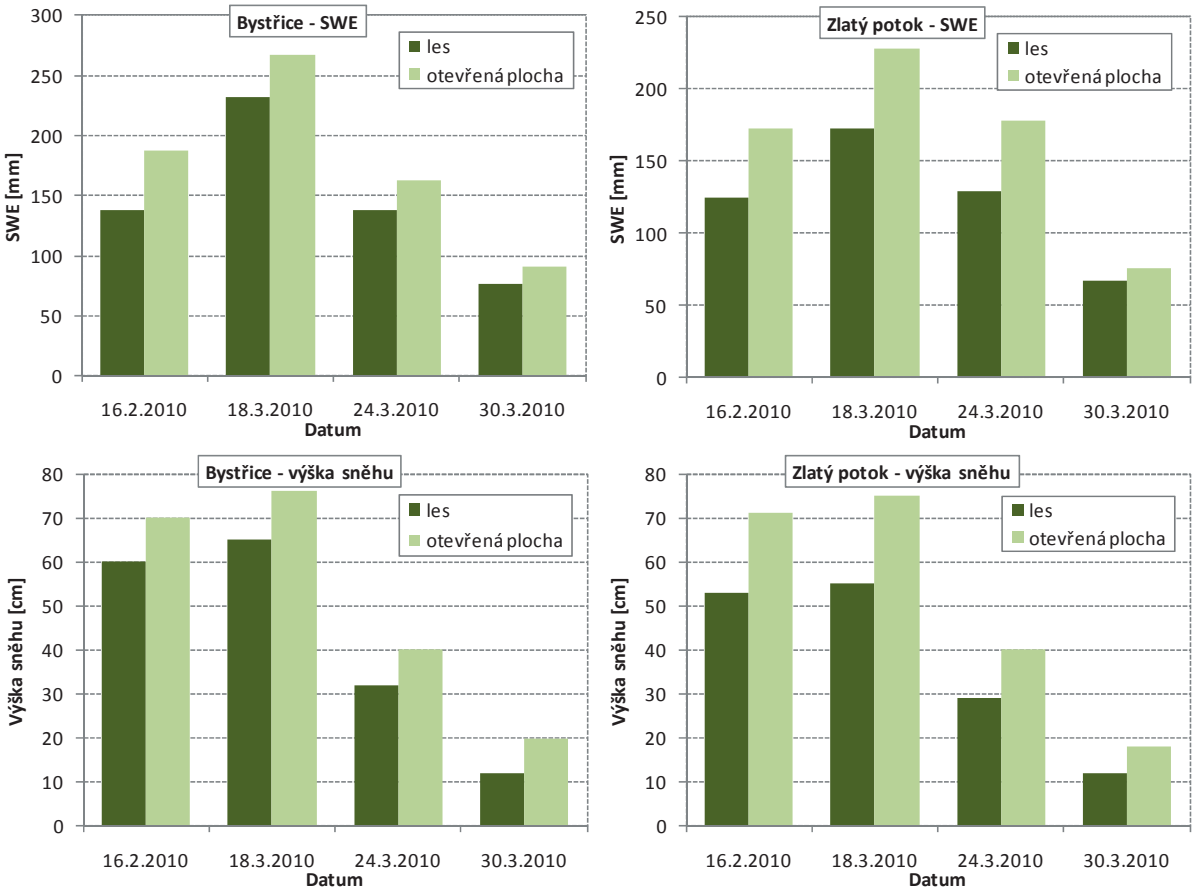
Modelování vlivu krajinného pokryvu na odtok ze sněhu z povodí proběhlo v jedné řešené studii pro celé povodí Bystřice pro tři scénáře krajinného pokryvu [13]. První variantou byl skutečný stav podle databáze CORINE Land cover 2000. Druhou variantou byl teoretický stav, ve kterém byly listnaté a smíšené lesy, orná půda, pastvina i louky nahrazeny jehličnatým porostem. Třetí varianta uvažovala nahrazení všech lesů na louky a pastviny. V modelu se jednotlivé krajinné pokryvy lišily hodnotou degree-day faktoru, při jehož výpočtu se vycházelo ze studie Federera [11]. Výsledné hodnoty degree-day faktoru byly 4,1 $mm.°C.d^{-1}$ pro skutečný stav krajinného pokryvu, 2,7 $mm.°C.d^{-1}$ pro hypotetický stav jehličnatého lesa a 6,3 $mm.°C.d^{-1}$ pro teoretický scénář nezalesněného povodí.

3. Výsledky

Při aplikaci celistvé formy sněhové komponenty hydrologického modelu HEC-HMS byla vyhodnocena simulace akumulace a tání sněhové pokrývky na povodí Bystřice po závěrový profil Ostrov následovně [13]. Dobrou shodu mezi simulovaným a pozorovaným vývojem vodní hodnoty sněhu vyznačovaly především vrcholové a horní polohy ve sledovaném povodí, ve střední části již docházelo k určité chybě a většinou nevyhovující shoda byla zaznamenána v nižších nadmořských výškách povodí Bystřice. Z jednotlivých výsledků vyplynulo, že různý charakter a průběh zimního období může mít vliv na schopnost modelu simulovat odtok a vodní hodnotu sněhu.

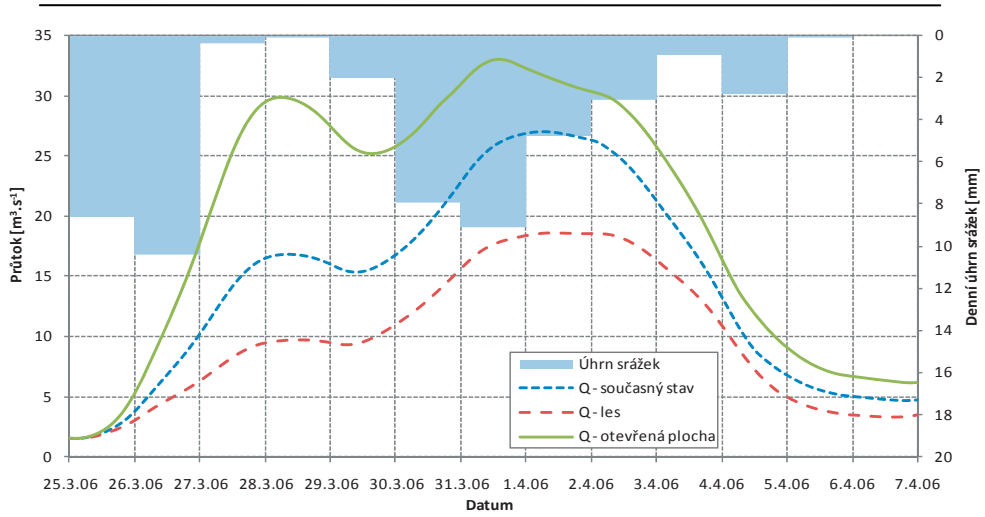
Rozložení sněhu v povodí je významně ovlivněno např. sklonem, expozicí, nadmořskou výškou, vegetací atd. Většina interpolačních technik však nezohledňuje vliv fyzickogeografických charakteristik povodí na rozložení sněhové pokrývky. Pouze několik jich do interpolace výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu zahrnuje vliv nadmořské výšky. U takových metod byl prokázán signifikantní vztah s oběma měřenými charakteristikami, a to především díky tomu, že vybrané modelové povodí Bystřice je horským povodím s významným výškovým rozpětím (394 – 1244 m n. m.). Z hlediska interpolace výšky sněhu na povodí Bystřice poskytla nejlepší výsledky metoda ORO, která vysvětlila variabilitu výšky sněhové pokrývky ze 78 %. Obdobných výsledků dosáhla rovněž metoda RK, OK a cokrigingu (77 – 73 %). Špatnou předpovědní schopnost má naopak metoda IDW, která vysvětlila jen 48 % z celkové variability výšky sněhové pokrývky, a metoda Thiessenových polygonů, která vysvětlila pouhých 20 % variability SCE. Při interpolaci vodní hodnoty sněhu na stejném povodí dosáhla nejlepší předpovědní schopnosti metoda RK (73 %). Vyhovujícími byly také metody ORO, cokriging a OK (73 – 62 %). Nejhorší výsledky poskytla metoda IDW (27 %) a Thiessenových polygonů (11 %).

Během letošní zimní sezóny byla provedena čtyři terénní měření v horní části Zlatého potoka a Bystřice (Obr. 2). Nejvyšší hodnoty naměřené výšky sněhu i vodní hodnoty sněhu byly zaznamenány 18. 3. V období tání v druhé polovině března byla provedena tři měření. Měření vždy probíhalo jak v lese, tak i na otevřené ploše. Oproti očekávání [12] nebyly prokázány vyšší hodnoty vodní hodnoty sněhu v lese než na loukách v závěru zimy, které byly způsobeny pomalejším odtáváním sněhu v lese. Je nutné zdůraznit, že naměřené hodnoty na konci zimy mohou být zatíženy chybou, která vychází z velkého rozpětí měřených hodnot.



Obr. 2: Vodní hodnota sněhu (SWE) a výška sněhu v lese a na otevřených plochách v zimě 2009/2010 v povodích horní Bystřice a Zlatého potoka [13]

Pomocí koncepčního modelu HEC-HMS a metody teplotního indexu byly provedeny simulace vlivu lesa a otevřených ploch na průběh akumulace a tání sněhové pokrývky a na následný odtok ze sněhu na příkladu jarní povodně 2006 způsobené vysokými teplotami, vysokým úhrnem kapalných srážek a následným táním sněhové pokrývky v povodí. Z výsledných hydrogramů (Obr. 3) lze vyvodit vliv odlišných krajinných pokryvů na odtok ze sněhu na povodí Bystřice ve zvoleném období 25. 3. 2005 – 7. 4. 2006. Pomalejší tání sněhové pokrývky v lesním porostu má logicky za následek skutečnost, že oproti skutečnému stavu zůstávají v povodí velké zásoby sněhu i po proběhlé povodňové vlně [viz 13]. Dá se očekávat, že další případné dešťové srážky mohou opět způsobit rychlé tání sněhu s následkem povodně, kulminace by však neměla dosáhnout již tak vysokých hodnot. Lesní pokryv v povodí ovlivňuje rychlost odtávání sněhu, které rozkládá do delšího časového období s více dílčími maximy průtoku. Ty ale nedosahují tak vysokých hodnot jako v případě zastoupení pouze otevřených ploch v povodí. I když výsledky modelování poukázaly na vliv lesa na tání sněhu, letošní terénní měření tuto skutečnost plně neprokázalo. Důvodů se nabízí více a budou muset být diskutovány podrobněji před další zimní sezónou. Možným vysvětlením je malý počet terénních výjezdů a nedokonale zvolená síť měřených bodů vzhledem k charakteru území.



Obr. 3: Modelované hydrogramy průtoku v závěrovém profilu Ostrov 25. 3. 2005 – 7. 4. 2006 pro současný stav a hypotetické varianty krajinného pokryvu „les“ a „otevřená plocha“ [13]

Měření vždy probíhalo na hranici lesa a otevřené plochy v obou krajinných pokryvech. Výsledky měření na loukách tedy reflektují situaci v blízkosti lesa, kde mohou panovat jiné radiační a větrné podmínky než v případě velkých otevřených ploch. Do budoucna by bylo vhodnější do současného stavu měření zakomponovat měření ryze v lesním porostu bez otevřeného vlivu louky a na zcela otevřeném místě. Obzvláště v období tání je potřeba co nejpřesněji zachytit rozdíly mezi vodní hodnotou sněhu v lese a na loukách za účelem odhadu odtoku vody z povodí. Dalším důvodem sporných výsledků může být velký rozptyl naměřených hodnot v době před úplným roztátím, kdy již povodí není souvisle pokryto sněhovou pokrývkou a lze tedy těžko vyvozovat přesné závěry.

4. Diskuze a závěry

V rámci výzkumu katedry fyzické geografie a geoekologie byla na experimentálních územích v Krušných horách v letech 2008 – 2010 provedena měření výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu, která byla a budou nadále analyzována v řadě studiích.

V závislosti na vybrané interpolační technice a na jejím nastavení lze zlepšit předpověď množství vody akumulované ve sněhové pokrývce v daném povodí. Podle výsledků poskytují nejlepší předpovědní schopnost metody ORO a RK, tedy metody, které zahrnují vliv nadmořské výšky. Do budoucna má smysl věnovat se zlepšení předpovědi rozložení sněhové pokrývky pomocí zahrnutí dalších fyzickogeografických charakteristik. Kvalita vstupních dat významným způsobem ovlivňuje výsledky hydrologického modelování.

Pomocí koncepčního modelu HEC-HMS a metody teplotního indexu byly provedeny simulace vlivu lesa a otevřených ploch na průběh akumulace a tání sněhové pokrývky a na následný odtok ze sněhu na příkladu jarní povodně 2006 způsobené vysokými teplotami, vysokým úhrnem kapalných srážek a následným táním sněhové pokrývky v povodí [13]. Výsledky modelování ukázaly na nejednoznačnost hodnocení vlivu lesa a otevřených ploch na odtok z povodí v případě, že událost je tvořena více vlnami. V případě lesa sice u první vlny dojde k výraznému snížení, naproti tomu zůstanou v povodí vyšší zásoby sněhu, které mohou způsobit vyšší kulminaci případné druhé vlny. Přesto lze na základě výsledků předpokládat, že kulminační průtoky v případě zalesnění nebudou dosahovat tak vysokých hodnot, jako v případě vyššího zastoupení otevřených ploch.

Modelování srážko-odtokových procesů v povodí ukázalo na řadu nejistot vyplývajících jednak ze vstupních dat a jednak z použitého modelu a modelovacích technik. Jednu z nejistot představuje samotný princip měření sněhu v povodí a interpretace dat. Nejistota použitého modelu vychází především z parametrizace sněhového modelu (určení teplotního

faktoru tání nebo infiltrace vody do půdy) a průběhu výpočtu (nezohlednění denního chodu tání). Je třeba zdůraznit, že získané výsledky jsou příkladem povodí s konkrétními fyzickogeografickými podmínkami a pro konkrétní příčinnou situaci. Interpretace výsledků by měla být založená především na hodnocení zjištěných odlišností v provedených simulacích než na pouhé kvantifikaci modelovaných povodňových vln.

Literatura

[1] BEVEN, K. J., 2001. Rainfall-runoff Modelling, The Primer. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 360 pp.

[2] DAŇHELKA,J. – KREJČÍ, J. – ŠÁLEK, M. – ŠERCL, P. – ZEZULÁK, J., 2003. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. Česká zemědělská univerzita, Praha, 189 s.

[3] DEWALLE, D. R. – RANGO, A., 2008. Principles of snow hydrology. Cambridge University Press, Cambridge, 410 pp.

[4] KREMSA, J., 2008. Vliv lesa na akumulaci a tání sněhu a doplňování zásob podzemní vody, Paljakka (Finsko). ČVUT, Fakulta stavební, Praha, 104 s.

[5] NĚMEC, L., 2006. Vodní hodnota sněhové pokrývky. In: *Sborník semináře Stretnutie sneharov - Nová Ves 2006*. ČHMÚ, Praha, s. 41 – 43.

[6] JENÍČEK, M. – KOCUM, J. – JELÍNEK, J., 2008. Monitoring sněhové pokrývky v povodí Rokytky v letech 2007 a 2008. In: Broža, V., Szolgay, J., Fošumpaur, P. (Eds.) *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Praha. ČVÚT, 227 – 236.

[7] KOCUM, J. – JELÍNEK, J. – JENÍČEK, M., 2009. Monitoring sněhové pokrývky a vyhodnocení sněhových zásob na Šumavě a v Krušných horách. In: Hanková, R., Klose, Z., Pavlásek, J. (Eds.) *XIV. Medzinárodné stretnutie snehárov*. Praha. Česká zemědělská univerzita, 105 – 113.

[8] EEA., 2010. Corine land cover – data download [online] [cit. 2010-06-26]. European Environment Agency, Copenhagen. <http://eea.europa.eu/themes/landuse/clc/-download>

[9] JENÍČEK, M., 2009. Runoff charges in areas differing in land use in the Blanice River Basin – application of the deterministic model Journal of Hydrology and Hydromechanics, 57, 3, 154 – 161.

[10] SCHARFFENBERG, W. A. – FLEMING, M. J., 2009. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User´s Manual. USACE, Davis. 289 pp.

[11] FEDERER, C. A. – PIERCE, R. S. – HORNBECK, J. W., 1972. Snow management seems unlikely. In: *Proceedings Symposium on Watersheds in Transition*. American Water Resources Association, 212 – 219.

[12] POBŘÍSLOVÁ, J. – KULASOVÁ, A. 2000. Ukládání a tání sněhu v lese a na odlesněných partiích Jizerských hor. Opera Corcontica, 37, s.113 – 119.

[13] JENÍČEK, M. – TAUFMANNOVÁ, A., 2010. Vliv vegetace na akumulaci a tání sněhu – výběr z výsledků výzkumu Katedry fyzické geografie a geoekologie PřF UK v letech 2009 a 2010. In: Jirák et al. (Ed.). *XV. Medzinárodné stretnutie snehárov*. Praha: ČHMÚ. [in print].

Kontakty na autora

1 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43 Praha 2, e-mail: alice.taufmannova@guycarp.com, jenicek@natur.cuni.cz