

LUCIE KUTLÁKOVÁ, MICHAL JENÍČEK

MODELOVÁNÍ AKUMULACE A TÁNÍ SNĚHU V POVODÍ BYSTRICE V KRUŠNÝCH HORÁCH

KUTLÁKOVÁ, L., JENÍČEK, M.: (2012): Modelling Snow Accumulation and Snowmelt in the Bystrice River Basin. *Geografie*, 117, No. 1, pp. 110–125. – Effectively dealing with spring flooding issues should focus primarily on their causes. It is therefore important to study the processes of snow accumulation and snowmelt, especially in mountain areas. In this article, we use the lumped modelling approach of the rainfall-runoff model HEC-HMS, along with the temperature-index method for snow accumulation and snowmelt computation. Three winter periods were used for model calibration and testing: 2005/06, 2007/08 and 2008/09. Developments in the snow-water equivalent were simulated and the accuracy of simulated hydrographs was assessed, against actual observations, in the Ostrov outlet in the Bystrice River basin in the Krušné Hory Mountains. The published results present fundamental uncertainties in winter flood modelling and demonstrate the influence of the course and character of a given winter on the model's capability to simulate the snow water equivalent and runoff.

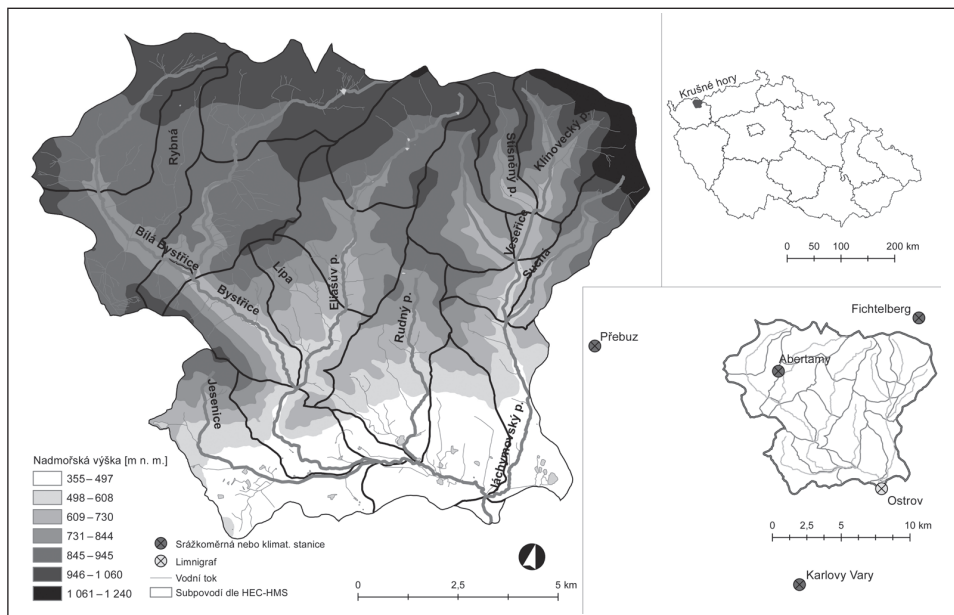
KEY WORDS: HEC-HMS – snow accumulation – snowmelt – temperature index – Bystrice River.

Príspevek byl vytvořen s podporou výzkumného záměru MSM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“ Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

1. Úvod

Tání sněhu vlivem zvýšené teploty, doprovázené dešťovými srážkami, představují v Česku častou příčinu vzniku povodně. Četné studie ukazují na různou míru vlivu přírodních faktorů na ukládání a tání sněhové pokrývky v průběhu zimního období a na jaře. Z regionálního hlediska patří mezi nejdůležitější faktory nadmořská výška, ale v lokálním měřítku se zvyšuje význam dalších faktorů, např. sklonu, expozice a především vegetace (Jost a kol. 2007; Kocum, Jelínek, Jeníček 2009). Specifický vliv na odtok vody z pramenných oblastí v podmínkách Česka mají rašeliniště (Janský, Kocum 2008) a významnou roli hraje také antropogenní transformace říčních koryt, údolních niv a změny ve využití území (Langhammer, Sitař 2008; Kliment, Matoušková 2009). Zvýšené riziko vzniku povodní z tání sněhu existuje v podmínkách Česka především u horských a podhorských povodí s dominancí sněhového režimu odtoku.

Nejintenzivnější výzkum procesů akumulace a tání sněhové pokrývky je tradičně situován v zahraničí, v oblastech vysokých pohorí s dominancí sněhového a ledovcového režimu vodních toků. Četné studie se zaměřují na objasnění vlivu fyzicko-geografických faktorů, které ukládání a tání sněhu ovlivňují. Vlivem



Obr. 1 – Poloha zájmového povodí Bystřice. Zdroj dat: DIBAVOD, DMÚ 25.

vegetace a topografie na akumulaci a tání sněhu se zabývali například Jost a kol. (2007) nebo Koivusalo, Kokkonen (2002). Autoři Hock (2003) nebo Richard, Gratton (2001) se věnují významnosti vlivu teploty vzduchu při tání sněhu, protože teplota vzduchu často vstupuje do sněhových modelů jako hlavní proměnná při použití metody teplotního indexu. Přesnější, ale zároveň složitější metoda energetické bilance je popsána například v pracích Assafa (2007) nebo Fernándeze (1997). Současný výzkum měření charakteristik sněhové pokrývky se věnuje nejen tradičním metodám pozemních měření, ale také se intenzivně zabývá možnostmi použití moderních technologií dálkového průzkum Země (Moloch, Margulis 2008; Storvold a kol. 2006).

V podmínkách Česka je výzkum prováděn především Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) v experimentálních povodích v oblasti Jizerských hor a v západních Krkonoších (Kulasová a kol. 2006). Podrobně se měří výška sněhové pokrývky a vodní hodnota sněhu. V rámci experimentálních povodí je také vyhodnocována funkčnost a spolehlivost přístrojů pro kontinuální měření vodní hodnoty sněhu. Dokladem výzkumu v Česku a na Slovensku je velké množství studií, např. Jeníček, Taufmannová (2010); Kocum, Jelínek, Jeníček (2009); Holko a kol. (2009); Pobřísllová, Kulasová (2000). Podrobný přehled současného výzkumu v regionu Střední Evropy uvádějí Holko, Gorbachova, Kostka (2011).

Hlavním cílem prezentovaného výzkumu, který byl prováděn v rámci zpracování diplomové práce první autorky článku, bylo modelování odtoku ze sněhové pokrývky na vybraném povodí při aplikaci celistvé formy sněhové komponenty hydrologického modelu HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*). V rámci práce byly řešeny následující dílčí cíle: (a) vyhodnocení simulací odtoku ze sněhové pokrývky a porovnání s pozorovanými daty

průtoku a vodní hodnoty sněhu a (b) posouzení vhodnosti použitého modelu na vybraném povodí, identifikace jeho silných a slabých stránek a návrh směru dalšího výzkumu.

Testování modelu proběhlo na horském povodí Bystřice (plocha povodí 127,6 km², délka toku 22,2 km), které se nachází ve střední části Krušných hor a tvoří levostranný přítok řeky Ohře (obr. 1). Modelovaný úsek řeky uzavírá limnigrafická stanice Ostrov provozovaná ČHMÚ. Na rozdělení odtoku během roku a pro tvorbu zásob vody v povodí mají rozhodující význam zimní srážky a následné tání sněhové pokrývky.

2. Metodika a podkladový materiál

Modelování vývoje vodní hodnoty sněhu (SWE) a odtoku ze sněhové pokrývky probíhalo v hydrologickém modelu HEC-HMS, který byl vyvinut střediskem USACE (*United States Army Corps of Engineers*). Model byl vytvořen pro simulaci srážko-odtokových procesů v povodí a řadíme ho mezi deterministické, koncepční modely (Jeníček 2006). V rámci práce byl použit celistvý (*lumped*) přístup k modelování a záměrem bylo porovnat simulované výsledky vývoje vodní hodnoty sněhu a odtoku ze sněhové pokrývky s naměřenými a odvozenými údaji, a tím vystihnout celkovou bilanci akumulace a tání sněhu v povodí Bystřice za zvolená zimní období.

Pro zpracování prostorových vstupních dat do modelu bylo využito programu ArcGIS a jeho rozšíření ArcHydro Tools a HEC-GeoHMS. Pro tvorbu digitálního modelu terénu a výpočet hydrologických charakteristik povodí byl použit vektorový model DMÚ 25.

V prostředí modelu HEC-HMS byla pro výpočet přímého odtoku (*Direct-Runoff Model*) použita metoda jednotkového hydrogramu, pro výpočet objemu odtoku (*Runoff-Volume Model*) byla použita metoda SCS Curve Number, pro stanovení podzemního odtoku (*Baseflow Model*) byla aplikována metoda exponenciálního poklesu a korytový odtok (*Channel Model*) byl modelován metodou Muskingum-Cunge. Fyzikální podstatu jednotlivých metod podrobně popisují například Beven (2001) nebo Feldman (2000). Pro výpočet parametrů metod bylo použito standardních a často užívaných postupů (Jeníček 2009, Šercl 2009).

Nejdůležitější modelovací technikou v práci byl sněhový model, který v modelu HEC-HMS vychází z klasické metody teplotního indexu (Temperature Index, rovnice 1).

$$M = DDF \times \max(0, T_a - T_c) \quad (1)$$

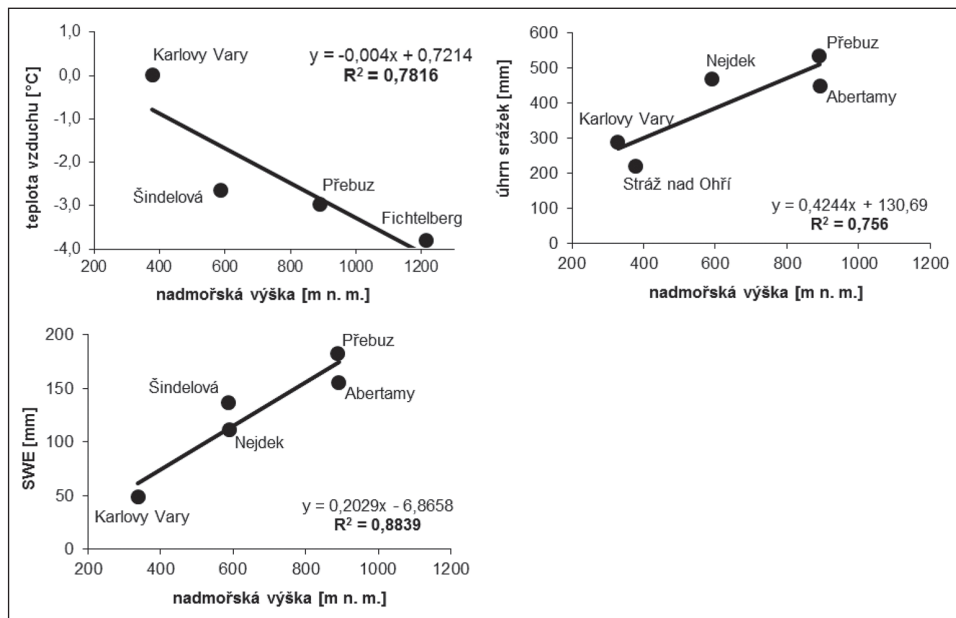
kde M je množství roztátého sněhu v mm.d⁻¹, DDF je teplotní index (*Degree-day factor*) v mm.°C⁻¹.d⁻¹ definován jako denní úbytek vodní hodnoty sněhu při zvýšení teploty o jeden stupeň Celsia nad kritickou teplotu T_c , T_a je průměrná teplota vzduchu ve °C a T_c je kritická teplota ve °C, při které začíná proces tání. Z rovnice vyplývá, že tání probíhá pouze v případě $T_a > T_c$.

Princip metody a vytvořený model je podrobně popsán v manuálu programu (Fleming, Scharffenberg 2009). Model počítá akumulaci a tání sněhu na základě průměrných vstupních údajů o teplotě vzduchu a úhrnů srážek pro jednotlivá subpovodí (viz obr. 1). Zvolená metoda zohledňuje jak tání během vypadávání srážek, tak tání v bezsrážkovém období a snaží se vystihnout

Tab. 1 – Vstupní parametry modelu teplotního indexu v *HEC-HMS* pro celé povodí, subpovodí a výšková pásma

Parametr	Význam	Jednotky
Celé povodí		
PX Temperature	Teplota rozlišující mezi kapalnými a pevnými srážkami	[°C]
Base Temperature	Teplota, při které začíná tání sněhu	[°C]
Wet Meltrate	Teplotní index tání v době vypadávání srážek	[mm.°C.d ⁻¹]
Rain Rate Limit	Denní srážkový úhrn, při jehož překročení se počítá s Wet Meltrate	[mm.d ⁻¹]
ATI-Meltrate Coef.	Koeficient používán při výpočtu indexu tání v každém časovém kroku	—
ATI-Meltrate Func.	Závislost ATI a teplotního indexu tání (sezonalita teplotního indexu)	—
Meltrate Pattern	Nepovinný parametr upravuje index tání v závislosti na ročním období	—
Cold Limit	Prahová hodnota denního úhrnu srážek	[mm.d ⁻¹]
ATI-Coldrate Coeff.	Koeficient používán při výpočtu teplotního deficitu v každém časovém kroku	—
ATI-Coldrate Func.	Závislost ATI a teplotního deficitu (sezonalita teplotního indexu)	—
Water Capacity	Objem kapalné vody ve sněhové pokrývce (na počátku simulace)	[%]
Groundmelt Method	Zvolení metody zohledňující tání způsobené kladnou teplotou povrchu	—
Groundmelt	Intenzita tání způsobená kladnou teplotou povrchu	[mm.d ⁻¹]
Subpovodí		
Lapse Rate	Vertikální gradient teploty	[°C/1 000 m]
Výškové pásmo subpovodí		
Percent	Plocha výškového pásma v daném subpovodí	[%]
Elevation	Průměrná nadmořská výška daného pásma	[m n. m.]
Initial SWE	Počáteční hodnota SWE (vodní hodnota sněhu)	[mm]
Initial Cold Content	Počáteční hodnota teplotního deficitu	[mm]
Initial Liquid Water	Počáteční objem kapalné vody ve sněhové pokrývce	[mm]
Initial Cold Content ATI	Počáteční hodnota ATI pro výpočet teplotního deficitu	[°C]
Initial Melt ATI	Počáteční hodnota ATI pro výpočet teplotního faktoru tání	[°C.d ⁻¹]

pomocí teploty vzduchu celkovou energetickou bilanci sněhové pokrývky. Do sněhového modelu se zadávají vstupní parametry (tab. 1) pro celé povodí – *PX Temperature* (hraniční teplota vzduchu kapalných a pevných srážek), *Wet meltrate* (teplotní index tání v době vypadávání srážek) a *Groundmelt* (intenzita tání způsobená kladnou teplotou zemského povrchu). Pomocí těchto parametrů nelze ale dobře vystihnout případnou prostorovou a časovou variabilitu. Proto do modelu vstupují také parametry jednotlivých subpovodí, které jsou ještě dále členěny na výšková pásma.



Obr. 2 – Lineární závislost teploty vzduchu, úhrnu srážek a SWE na nadmořské výšce na příkladu zimního období 2005/2006. Zdroj dat: ČHMÚ, POH.

Pro plošnou interpolaci bodově naměřených meteorologických dat byla použita metoda orografické interpolace, která vychází z předpokladu lineární závislosti interpolované veličiny na nadmořské výšce. Metodika stanovuje regresní vztah obou veličin a v případě, že je mezi nimi signifikantní závislost, může se přistoupit k výpočtu časových řad jednotlivých veličin za sledované období. Průměrné denní hodnoty jednotlivých meteorologických veličin byly zpracovány z pozemních stanic ČHMÚ, Povodí Ohře, s. p. (POH) a Deutscher Wetterdienst (DWD) v blízkém okolí povodí (obr. 1). Metoda byla aplikována pro stanovení plošného rozdělení teploty vzduchu, úhrnu srážek a vodní hodnoty sněhu (obr. 2). Výpočet průměrných hodnot zmiňovaných veličin na povodí byl stanoven pomocí mapové algebry a zonální statistiky z regresních rovnic pro jednotlivé modelované události.

Kalibrace modelu je jednou z nejdůležitějších a zároveň nejkomplikovanějších částí procesu hydrologického modelování. Hydrologický model *HEC-HMS* byl kalibrován na povodí Bystřice pro zimní období od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006. Postup kalibrace je podrobně popsán v práci Jeníčka a Taufmannové (2010), kteří při odvozování parametrů *DDF* vycházeli ze studie Federera, Pierce, Hornbecka (1972).

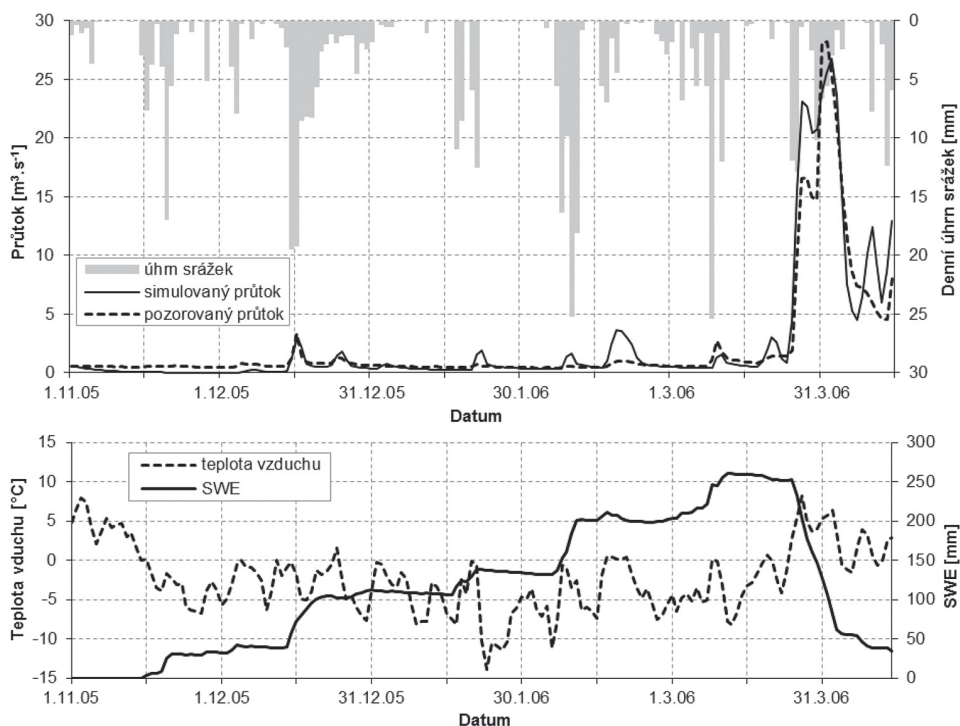
Modelování vývoje vodní hodnoty sněhu a odtoku ze sněhové pokrývky probíhalo v hydrologickém modelu *HEC-HMS* pro všechna vybraná zimní období (2005/06, 2007/08 a 2008/09) vždy od 1. 11. do 14. 4. Sada parametrů pro každé dílčí povodí modelu (celkem 21 dílčích povodí) byla nastavena zvlášť pro každé zimní období na základě provedené manuální kalibrace. Kalibrovány byly parametry *PX Temperature*, *Wet Meltrate* a *Groundmelt*. Úspěšnost modelování vývoje vodní hodnoty sněhu a odtoku ze sněhové pokrývky byla provedena pro

každou simulovanou událost a vyhodnocena na základě standardně používaných objektivních kritérií – *Nash-Sutcliffe (N-S)*, procentní objemové chyby a relativní chyby kulminace (Daňhelka a kol. 2003).

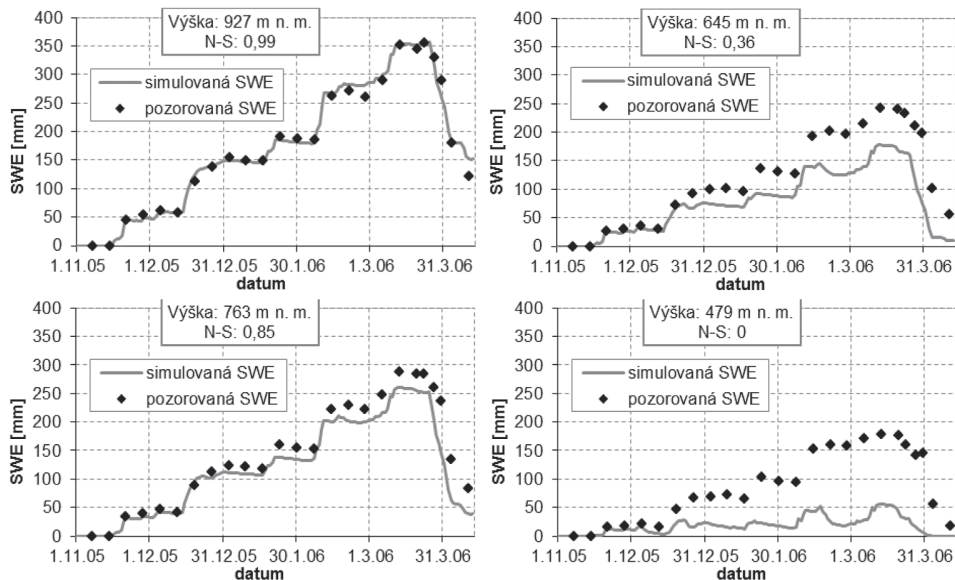
3. Výsledky

3.1. Zimní období 2005/2006

V zimním období 2005/2006 se sníh postupně akumuloval již od konce listopadu, v jeho průběhu nedocházelo k dílčím oblevům a v povodí se vyskytovaly vysoké zásoby sněhu. Jarní povodeň 2006 byla zapříčiněna kombinací mnoha aspektů: atmosférická cirkulace, vysoký úhrn srážek, vysoká teplota vzduchu, nadprůměrné zásoby sněhu ve všech nadmořských výškách, čerstvý vítr a velká oblačnost v nočních hodinách. Tání sněhu na konci března způsobily mimo jiné vysoké srážkové úhrny, které přišly ve dvou epizodách a významně přispěly k vytvoření dvou povodňových vln, přičemž model podružné maximum nadhodnotil a naopak hlavní maximum podhodnotil (obr. 3). V tomto případě se ukázala největší nevýhoda metody *SCS CN*, která spočívá v nesprávném výpočtu odtokové výšky v případě událostí tvořenými více srážkovými vlnami. Metoda také není vhodná k modelování déletrvajících událostí, což je ale



Obr. 3 – Pozorované a simulované hydrogramy, denní úhrn srážek, teplota vzduchu a vodní hodnota sněhu pro profil Ostrov od 1. 11. 2005 do 14. 4. 2006



Obr. 4 – Vodní hodnota sněhu pro vybraná dílčí povodí v zimním období 2005/2006

skutečnost, která je obecně známa (Beven 2001, Jeníček 2009). Kritérium *Nash-Sutcliffe* dosáhlo hodnoty 0,91, celková chyba kulminace byla 5 % a celková chyba objemu 8,5 %.

Pro zhodnocení úspěšnosti modelu byl také sledován simulovaný vývoj vodní hodnoty sněhu, který byl porovnáván s hodnotami odvozenými na základě pozorovaných dat (obr. 4). Z hlediska srovnání simulovaných a odvozených hodnot vodní hodnoty sněhu nastala velmi uspokojivá shoda především v horní části povodí (nad 800 m n. m.), kde kritérium *Nash-Sutcliffe* dosáhlo hodnoty 0,99. Ve střední části povodí již došlo k dílčím rozdílům a pod 700 m n. m. byly hodnoty výrazně podhodnoceny a pod hranici cca 600 m n. m. se již průběh *SWE* neshoduje. Uspokojivá shoda v horních částech povodí byla zapříčiněna především stabilními meteorologickými podmínkami s teplotami pod bodem mrazu. Vzniklé rozdíly v nižších nadmořských výškách mohly být způsobeny chybami vzniklými při výpočtu modelu, ale spíše mají svůj původ v použité orografické interpolační metodě naměřených staničních hodnot. Svoji roli také sehrál častější výskyt teploty vzduchu v okolí bodu mrazu, což je skutečnost, která tvoří jednu z hlavních nejistot použití metody teplotního indexu.

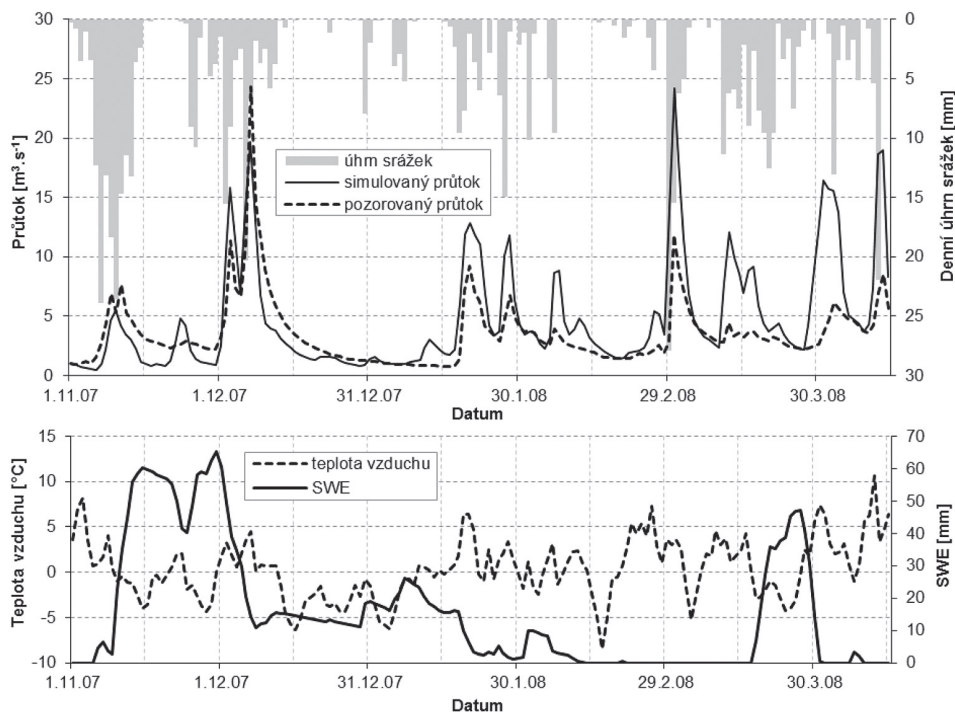
3.2. Zimní období 2007/2008

Zimní období 2007/2008 se vyznačovalo nadprůměrnou teplotou vzduchu (např. v lednu a únoru) blízko nuly, v povodí se nevyskytovaly významnější zásoby sněhu. Docházelo k dílčím oblevám, které ale podstatně neovlivnily průtoky na tocích kromě tání sněhu na začátku prosince roku 2007. Maximální průtok v daném období byl simulován počátkem března 2008. Událost byla spojena s tlakovou níží Emma, během níž dosahovaly dešťové úhrny srážek 50

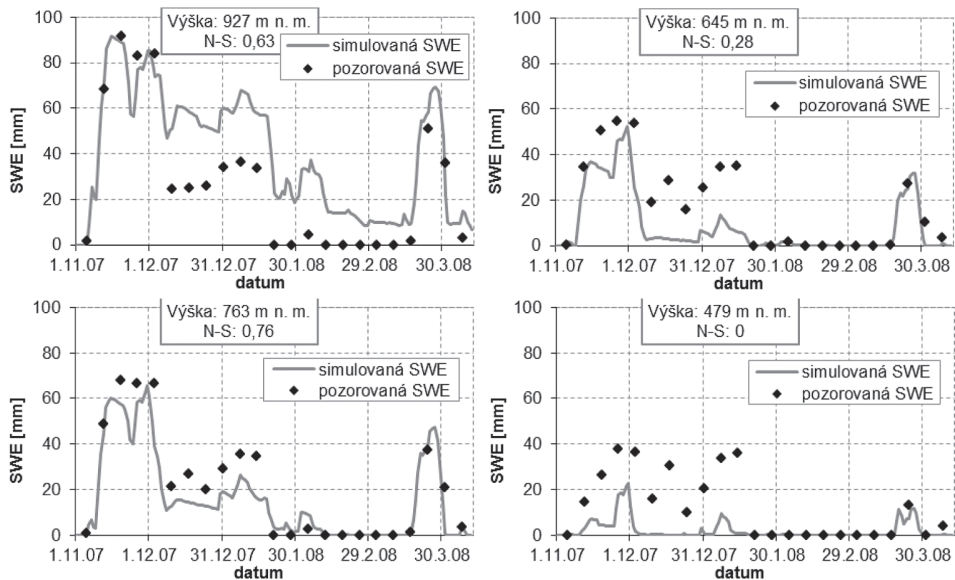
až 100 mm za den. Model tuto situaci ale silně nadhodnotil (obr. 5). Skutečný maximální průtok v prosinci roku 2007 ($24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) model simuloval uspokojivě. Průběh této události měl podobný ráz jako při tání sněhu na konci března roku 2006. Vznikly dvě povodňové vlny, podružné maximum bylo nadhodnoceno a hlavní maximum bylo modelem podceněno. Právě teplota vzduchu blízko nuly mohla způsobit rozdíly vzniklé mezi odvozenou (z pozorovaných dat) a simulovanou vodní hodnotou sněhu. To je dáno podstatou výpočtu metody teplotního indexu, konkrétně nastavením parametru *PX Temperature*. Z obrázku 5 je patrné výrazné nadhodnocení objemu odtoku (chyba objemu 32,7 %). Kritérium *Nash-Sutcliffe* dosáhlo neuspokojivé hodnoty 0,20.

Při modelování vývoje vodní hodnoty sněhu pro celé zimní období byla dosažena lepší shoda mezi simulovanou a pozorovanou *SWE* ve střední části povodí než v jeho vrcholových oblastech (obr. 6). Model nadhodnocoval *SWE* v období tání v první třetině prosince 2007. Ve skutečnosti po oteplení a srážkách v podobě deště prudce klesla hodnota *SWE*, model však simuloval její mírnější pokles. To mělo vliv na další vývoj *SWE* v průběhu sezóny.

Tato nesrovnalost byla mimo jiné způsobena parametrem teplotního indexu tání v době vypadávání srážek. Při jeho zvýšení se více vyrovnaly hodnoty *SWE* ve vrcholové části, ale naopak se velmi rozkolísaly ve střední a dolní části povodí. V subpovodích pod 700 m n. m. byla modelem hodnota *SWE* výrazně podceněna, což mohlo být způsobeno celkově nízkými zásobami sněhu ve spodní části povodí a také možnými chybami vyplývajícími z podstaty metody orografické



Obr. 5 – Pozorované a simulované hydrogramy, denní úhrn srážek, teplota vzduchu a vodní hodnota sněhu pro profil Ostrov od 1. 11. 2007 do 14. 4. 2008

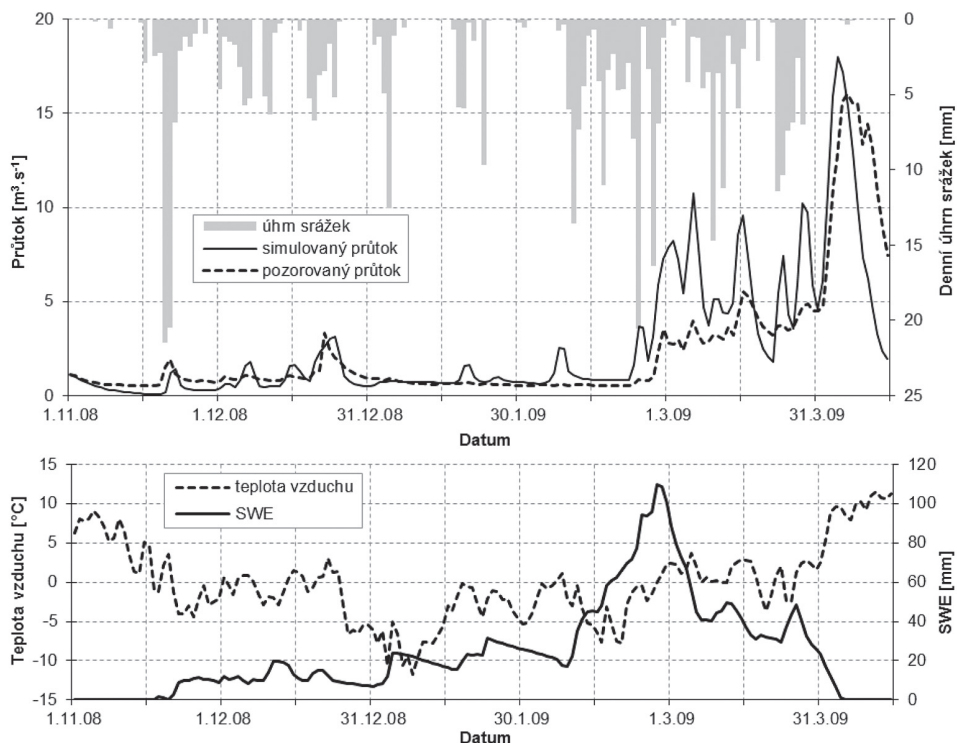


Obr. 6 – Vodní hodnota sněhu pro vybraná dílčí povodí v zimním období 2007/2008

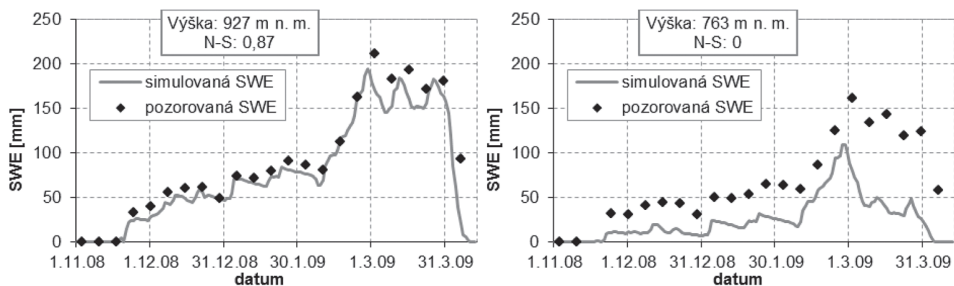
interpolace. Uvedené rozdíly by mohly být shlazeny použitím diferencovaných hodnot teplotního indexu (např. pro jednotlivá výšková pásma nebo subpovodí). Model *HEC-HMS* ale tuto variantu neumožňuje.

3.3. Zimní období 2009/2010

Posledním modelovaným obdobím byla zima 2008/2009, která se vyznačovala akumulací sněhu již od konce listopadu. Přesto celkové zásoby sněhu nedosahovaly hodnot ze zimy 2006. Sněhová pokrývka se souvisle vyskytovala až od středních poloh (od 750 m n. m.), v nižších nadmořských výškách docházelo k častějšímu kolísání teploty vzduchu a tedy k častějším oblevům a značné proměnlivosti výšky sněhové pokrývky i její vodní hodnoty. Oproti jarnímu období 2006 docházelo na přelomu března a dubna 2009 k postupnému odtávání sněhu v důsledku oteplování a bez přičinění dešťových srážek. Menší dílčí oblevy v relativně krátkých časových intervalech nastaly v průběhu měsíce března a na jeho konci začal sníh pozvolna odtávat. Došlo tak ke zvýšení průtoku na toku, které prostupně odeznívalo. Model však vyhodnotil danou situaci rychlým nástupem i poklesem povodňové vlny, kdy skutečnou dobu kulminace předběhl o dva dny (obr. 7). Chyba vzniklá při simulaci byla pravděpodobně zapříčiněna největší nevýhodou metody teplotního indexu modelu *HEC-HMS*, která je koncipována pro denní časový krok. Využitím průměrné denní teploty vzduchu společně s konstantní hodnotou teplotního indexu není proto možné dostatečně správně simulovat denní chod tání sněhové pokrývky. Celkovou úspěšnost modelování odtoku ze sněhové pokrývky lze vyjádřit pomocí zvolených objektivních kritérií. Kritérium *Nash-Sutcliffe* dosáhlo hodnoty 0,62, chyba kulminace a chyba objemu dosáhly shodně 20 %.



Obr. 7 – Pozorované a simulované hydrogramy, denní úhrn srážek, teplota vzduchu a vodní hodnota sněhu pro profil Ostrov od 1. 11. 2008 do 14. 4. 2009



Obr. 8 – Vodní hodnota sněhu pro vybraná dílčí povodí v zimním období 2008/2009

Vývoj vodní hodnoty sněhu v případě zimy 2008/2009 byl zkoumán až od středních poloh povodí, tedy od 750 m n. m. (obr. 8). Důvodem byla především skutečnost, že v simulovaném období několikrát vypadlo měření teploty vzduchu na stanici Karlovy Vary – lázně, která reprezentuje dolní část povodí. Při interpolaci teplotních řad tak vznikla vyšší nejistota, která se mohla negativně projevit ve výsledcích simulace.

Při souhrnném vyhodnocení odvozených a simulovaných dat *SWE* je zřejmá uspokojivá shoda v horní části povodí a celkově dobrá shoda u povodí od

800 m n. m (kritérium *Nash-Sutcliffe* v rozsahu 0,65–0,87). Pod tuto hranici model výrazně podcenil především poslední třetinu sledovaného období, kdy sníh postupně odtával, ale model simuloval na počátku velmi rychlý pokles *SWE*.

4. Diskuze

Cílem práce bylo zhodnotit možnosti konkrétního modelovacího nástroje pro účely simulace akumulace a tání sněhu a mechanismu tvorby odtoku vody z povodí v průběhu jarního tání. Aplikace matematického modelování nám umožňuje lépe poznat přírodní procesy probíhající v povodí a lépe tak predikovat vznik, průběh a následky povodní. Samotné porozumění přírodním procesům a schopnost jejich predikce není jediným krokem nutným ke snížení rizika vzniku škod. Snížování rizika není dáno pouze pokrokem ve vědě a technologickým rozvojem, ale také komplexem ekonomických, sociálních a politických aspektů (Vilímk, Spilková 2009). V práci vnikla řada nejistot spojených s měřením a zpracováním vstupních dat, parametrizací modelu a volbou modelovacích technik.

Pro výpočet odtoku ze sněhové pokrývky je klíčovým parametrem teplotní index *DDF*. Parametr musí být odvozen jak pro srážkové, tak bezesrážkové období a jeho hodnota je ovlivněna mnoha faktory, například expozicí terénu, přítomností otevřených ploch a lesních porostů a stupněm metamorfózy sněhu (DeWalle, Rango 2008). Díky těmto vlivům hodnota *DDF* během zimního období kolísá v intervalu 1–8 mm °C⁻¹.d⁻¹. V práci byl použit experimentálně zjištěný vztah podle Federera, Pierce, Hornbecka (1972), který byl následně kalibrován (Jeníček, Taufmannová 2010). V rámci kalibrace byla zjišťována optimální hodnota parametru pro každou simulovanou událost. Výsledky tak nejsou obecně uplatnitelné na odlišné geografické podmínky, naproti tomu tento postup umožnil sledovat silné a slabé stránky použitého modelu. Do budoucna bude nutné stanovit hodnoty teplotního faktoru přímo, na základě experimentálních dat.

Důležitou roli hraje nastavení hodnoty parametru *PX Temperature*. Je obecně známo, že skupenství srážek je závislé nejen na teplotě, ale také na vlhkosti vzduchu (Singh, Singh 2001). Sníh tak může vypadávat i při teplotách vzduchu kolem 4 °C (běžně ale méně). Uvedená skutečnost hraje důležitou roli při výpočtu akumulace sněhu v podmínkách teplot vzduchu v okolí bodu mrazu a mohla být významným faktorem způsobující odchylky simulované *SWE* ve středních a nižších částech povodí.

Intenzita tání způsobená kladnou teplotou zemského povrchu, v modelu vystižena parametrem *Groundmelt*, závisí na meteorologických podmínkách před pokrytím povodí sněhem. Pokud půda není zmrzlá, způsobuje teplo vedené z půdy postupné odtávání báze sněhové pokrývky. Tavná voda se infiltrací dostává až do zóny nasycení a tím přispívá k základnímu odtoku (DeWalle, Rango 2008). Zmrzlá půda naopak způsobí snížení infiltrační schopnosti půdy, což následně vede ke zvýšení povrchového odtoku (Bayard a kol. 2005). Nejistota vzniká v případech, jestliže se v jedné části povodí vyskytuje zmrzlá půda a v jiné nikoliv. Parametr *Groundmelt*, který udává množství na bázi odtávající vody, se vztahuje k celému povodí a zůstává po celou dobu simulace neměnný a nedokáže tak prostorově ani časově zohlednit různé podmínky v povodí. Často nastává situace, kdy se promrzlá půda vyskytuje především ve středních nebo

v nižších polohách. Důvodem je skutečnost, že ve vrcholových partiích zpravidla napadne sněh dříve, než stihne půda promrznout.

Největší nevýhodou metody teplotního indexu je složitost použití kratšího časového kroku než denního. Časová odezva na vnější klimatické podmínky je často na povodích této rozlohy rychlejší. Využitím průměrné denní teploty vzduchu společně s konstantní hodnotou teplotního indexu není možné dostatečně přesně simulovat denní chod tání sněhové pokrývky. Uvedený nedostatek zdůrazňuje již zmiňovaná skutečnost, že parametry *PX Temperature*, *Wet Melt* a *Goundmelt* jsou v čase i prostoru neměnné a nelze jimi dobře vystihnout případnou prostorovou a časovou variabilitu.

Některé výše zmíněné nedostatky by bylo možné odstranit použitím distribuovaného modelu. Model *HEC-HMS* umožňuje v distribuované formě použít všechny klíčové komponenty srážko-odtokového procesu, včetně metody teplotního indexu. Trend v použití distribuovaných modelů dokazují také studie Shamir, Georgakakos (2006) nebo Garen, Marks (2005). K přesnějšímu odhadu parametrů by také přispělo podrobnější experimentální pozorování s použitím automatických sněhoměrných stanic.

Využití lineární regresní závislosti úhrnu srážek, teploty vzduchu a vodní hodnoty sněhu na nadmořské výšce se ukázalo jako jednoduchý, ale zároveň účelný prostředek pro odvození plošných průměrů veličin pro jednotlivá subpovodí (Hock 2003). Nejistoty použité metody vyplývají z nízkého počtu a občasných výpadků měřicích stanic. Významnou roli hraje jejich rozmístění uvnitř nebo v okolí zkoumaného povodí, což potvrzuje i studie Kostky (2001). Jednou z příčin rozdílů mezi simulovanou a pozorovanou *SWE* ve středních a nižších nadmořských výškách mohlo být právě vyžití pouze jedné měřicí stanice v dolní části povodí.

5. Shrnutí a závěry

V rámci práce proběhly simulace vybraných zimních období v modelu *HEC-HMS*, u kterých byl modelován vývoj akumulace vodní hodnoty sněhu, průběh tání sněhové pokrývky a následný odtok ze sněhu. Byla vybrána tři zimní období – 2005/06, 2007/08 a 2008/09, která se lišila svým průběhem. Cílem bylo zjistit, jak model reaguje na rozdílný charakter zimního období a jaká je jeho schopnost simulovat průběh *SWE* a odtok z povodí za rozdílných podmínek.

Z výsledků očekávaně vyplývá, že model *HEC-HMS* nejlépe simuluje zimní období, ve kterém se sněh postupně akumuluje, nedochází k dílčím oblevám a zároveň jarní tání sněhové pokrývky má rychlý průběh především díky vysoké teplotě vzduchu a vysokým srážkám (zima 2005/2006). Model má naopak problém správně vyhodnotit situace, při kterých dochází k častým oblevám v průběhu zimy a přitom se teplota vzduchu pohybuje okolo nuly. Model citlivě reaguje na hodnotu parametru *PX Temperature* a často chybně vyhodnocuje, zda se při vypadávaní srážek jedná o sněh nebo o déšť (zima 2007/2008). Chyby při simulaci nastávají také v případě postupného odtávání sněhu z povodí bez přičinění srážek. Důvodem jsou obtíže spojené s aplikací kratšího časového kroku než denního, pro který byla metoda původně vyvinuta. Nelze tak vystihnout denní chod tání sněhu, který hrál podstatnou roli při jarním tání v roce 2009 (zima 2008/2009).

Dobrou shodou mezi pozorovaným a simulovaným vývojem vodní hodnoty sněhu se vyznačovaly především vrcholové oblasti povodí, ve střední části již v některých případech docházelo k chybě a ve všech případech byla zaznamenána nevyhovující shoda v nižších nadmořských výškách. Důvodem bylo pravděpodobně kolísání teploty vzduchu kolem bodu mrazu v nízkých polohách.

Modelování akumulace a tání sněhové pokrývky ukázalo na řadu nejistot spojených jednak se vstupními daty a metodami jejich zpracování a jednak s použitým modelem a zvolenými modelovacími technikami. Sněhový model hraje dominantní roli v procesu modelování. Nejistoty vyplývají především z určení teplotního indexu, kritické teploty, intenzity tání způsobené kladnou teplotou povrchu a z nezhlednění denního chodu tání sněhové pokrývky v bezsrážkových obdobích.

Literatura:

- ASSAF, H. (2007): Development of an energy-budget snowmelt updating model for incorporating feedback from snow course survey measurements. *Journal of engineering, computing and architecture*, 1, č. 1, s. 1–5.
- BAYARD, D., STÄHLI, M., PARRIAUX, A., FLÜHLER, H. (2005): The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites insouthern Switzerland. *Journal of Hydrology*, 309, č. 1–4, s. 66–84.
- BEVEN, K. J. (2001): *Rainfall-runoff Modelling, The Primer*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 360 s.
- DANHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEŽULÁK, 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.
- DEWALLE, D. R., RANGO, A. (2008): *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, 410 s.
- 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, s. 212–219.
- FELDMAN, A. D. (2000): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. USACE, Davis, 155 s.
- FERNÁNDEZ, A. (1997): An Energy Balance Model of Seasonal Evolution. *Phys. Chem. Earth*, 23, č. 5–6, s. 661–666.
- FLEMING, M. J., SCHARFFENBERG, W. A. (2009): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS – User's Manual version 3.4*. USACE, Davis, 197 s.
- GAREN, D. C., MARKS, D. (2005): Spatially Distributed Energy Balance Snowmelt Modeling in a Mountainous River Basin: Estimation of Meteorological Inputs and Verification of Model Results. *Journal of Hydrology*, 315, č. 1–4, s. 126–153.
- HOCK, R. (2003): Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282, č. 1–4, s. 104–115.
- HOLKO, L., ŠKVARENINA, J., KOSTKA, Z., FRIČ, M., STAROŇ, J. (2009): Impact of spruce forest on rainfall interception and seasonal snow cover evolution in the Western Tatra Mountains, Slovakia. *Biologia*, 64, č. 3, s. 594–599.
- HOLKO, L., GORBACHOVA, L., KOSTKA, Z. (2011): Snow hydrology in Central Europe. *Geography Compass*, 5, č. 4, s. 200–218.
- JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2008): Peat bogs influence on runoff process: case study of the Vydra and Křemelná River basins in the Šumava Mountains, southwestern Czechia. *Geografie*, 113, č. 4, Praha, s. 383–399.
- JENÍČEK, M., TAUFMANNOVÁ, A. (2010): Vliv vegetace na akumulaci a tání sněhu – výběr z výsledků výzkumu Katedry fyzické geografie a geoekologie PříF UK v letech 2009 a 2010. In: Jiráček, J. et al. (eds.). *XV. Mezinárodní stretnutie snehárov*. ČHMÚ, Praha, s. 43–51.

- JENÍČEK, M. (2009): Runoff changes in areas differing in land-use in the Blanice River basin – application of the deterministic model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 57, č. 3, s. 154–161.
- JENÍČEK, M. (2006): Rainfall-runoff modelling in small and middle-large catchments – an overview. *Geografie*, 111, č. 3, s. 305–313.
- JOST, G., WEILER, M., GLUNS, D. R., ALILA, Y. (2007): The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale. *Journal of Hydrology*, 347, č. 1–2, s. 101–115.
- KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2009): Runoff changes in the Šumava Mountains (Black Forest) and the foothill regions: Extent of influence by Human Impact and Climate Change. *Water Resources Management*, 23, č. 9, s. 1813–1834.
- 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. Mezinárodní stretnutie snehárov, ČZÚ, Praha, s. 105–113.
- KOIVUSALO, H., KOKKONEN, T. (2002): Snow processes in a forest clearing and in coniferous forest. *Journal of Hydrology*, 262, č. 1–4, s. 145–164.
- KOSTKA, Z. (2001): Akumulácia, topenie a transport snehu v povodí s členitým reliéfom. *Acta Hydrologica Slovaca*, 2, č. 1, s. 113–121.
- KULASOVÁ, A., POBŘÍŠLOVÁ, J., JIRÁK, J., HANCVENCL, R., BUBENIČKOVÁ, L., BERCHA, Š. (2006): Experimentální hydrologická základna Jizerské hory. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 54, č. 2, s. 163–182.
- LANGHAMMER, J., SITAR, J. (2008): Modelling the impact of anthropogenic modifications to river channels on the course of extreme floods. Case study: August 2002 flood, Blanice River basin, Czechia. *Geografie*, 113, č. 3, s. 237–252.
- MOLOTCH, N. P., MARGULIS, S. A. (2008): Estimating the distribution of snow water equivalent using remotely sensed snow cover data and a spatially distributed snowmelt model: A multi-resolution, multi-sensor comparison. *Advances in Water Resources*, 31, č. 11, s. 1503–1514.
- POBŘÍŠLOVÁ, J., KULASOVÁ, A. (2000): Ukládání a tání sněhu v lese a na odlesněných partiích Jizerských hor. *Opera Corcontica*, 37, s. 113–119.
- RICHARD, C., GRATTON, D. J. (2001): The Importance of the Air Temperature Variable for the Snowmelt Runoff Modelling Using the SRM Model. 58th Eastern Snow Conference, Ontario, Canada.
- SHAMIR, E., GEORGAKAKOS, K. P. (2006): Distributed Snow Accumulation and Ablation Modeling in the American River Basin. *Advances in Water Resources*, 29, č. 4, s. 558–570.
- SINGH, P., SINGH V. P. (2001): *Snow and Glacier Hydrology*. Kluwer Academic Publisher. London, 742 s.
- ŠERCL, P. (2009): Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln. *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu*, 54, ČHMÚ, Praha, 88 s.
- STORVOLD, R., MALNES, E., LARSEN, Y., HØGDA, K. A., HAMRAN, S. E., MÜLLER, K., LANGLEY, K. A. (2006): SAR Remote sensing of Snow Parameters in Norwegian Area – Current Status and Future Perspective, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 20, č. 13, s. 1751–1759.
- VILÍMEK, V., SPILKOVÁ, J. (2009): Natural hazards and risks: the view from the junction of natural and social sciences. *Geografie*, 114, č. 4, s. 332–349.

S u m m a r y

MODELLING SNOW ACCUMULATION AND SNOWMELT IN THE BYSTRICE RIVER BASIN

Effectively dealing with spring flooding issues should focus primarily on their causes. It is therefore important to study the processes of snow accumulation and snowmelt, especially in mountain areas. In this article, we use the lumped modelling approach of the rainfall-runoff model HEC-HMS, along with the temperature-index method for snow accumulation and snowmelt computation. Three winter periods were used for model calibration and testing:

2005/06, 2007/08 and 2008/09. Developments in the snow-water equivalent were simulated and the accuracy of simulated hydrographs was assessed, against actual observations, in the Ostrov outlet in the Bystřice River basin in the Krušné Hory Mountains. The published results present fundamental uncertainties in winter flood modelling and demonstrate the influence of the course and character of a given winter on the model's capability to simulate the snow water equivalent and runoff.

The published results show the best simulations in winters with gradually accumulated snow, without partial thaws and with snowmelt caused by rain-on-snow situations (the 2005/2006 winter). However, the model struggles to simulate events with partial thaws and air temperature fluctuations near zero (the 2007/2008 winter). In such situations the model is very sensitive to the *PX Temperature* parameter value and is not able to correctly distinguish between liquid and snow precipitation. Errors are also identified in the case of snowmelt situations without any precipitation (the 2008/2009 winter). The snowmelt model cannot capture daily fluctuations of air temperature and, consequently, fails to monitor snowmelt intensity.

The development of the snow water equivalent was particularly well simulated in the upper part of the basin. There were some errors in the middle part of the basin and poor agreement of observed and simulated *SWEs* was recorded in the lower parts of the Bystřice River basin. The reason for this is likely more frequent air temperature fluctuations near zero and thaws in the lower parts of the basin.

Modelling processes of snow accumulation and snowmelt presented many problems associated with the input data, methods for data processing, application of the rainfall-runoff model and selection of model methods. The snow accumulation and snowmelt model plays a dominant role in the process of modelling. Uncertainties arise mainly from the derivation of the temperature index (*DDF*), threshold temperature differentiating between rain and snow, groundmelt and, finally, not accounting for daily fluctuations of air temperature and snowmelt.

Fig. 1 – Location of the Bystřice River basin. Elevation above sea level in meters. In the legend: precipitation-measuring or climatic station, limnigraph, watercourse. Data: DIBAVOD, DMU25.

Fig. 2 – Linear dependence of air temperature, precipitation and *SWE* on basin elevation. The 2005/2006 winter as an example. X axis – elevation above sea level, y axis – air temperature, precipitation, *SWE*. Data: CHMI, POH.

Fig. 3 – Observed and simulated hydrographs, daily precipitation, daily air temperature and snow water equivalent for the Ostrov outlet from 1 November 2005 to 14 April 2006. X axis – date, y axis – left: flow rate, right: daily precipitation totals, left: air temperature, right: *SWE*. In the legend: precipitation, simulated flow rate, observed flow rate, air temperature, *SWE*.

Fig. 4 – Snow water equivalent in select sub-basins in the 2005/2006 winter. In the legend: simulated *SWE*, observed *SWE*.

Fig. 5 – Observed and simulated hydrographs, daily precipitation, daily air temperature and snow water equivalent for the Ostrov outlet from 1 November 2007 to 14 April 2008. X axis – date, y axis – left: flow rate, right: daily precipitation totals, left: air temperature, right: *SWE*. In the legend: precipitation, simulated flow rate, observed flow rate, air temperature, *SWE*.

Fig. 6 – Snow water equivalent in selected sub-basins in the 2007/2008 winter. In the legend: simulated *SWE*, observed *SWE*.

Fig. 7 – Observed and simulated hydrographs, daily precipitation, daily air temperature and snow water equivalent for the Ostrov outlet from 1 November 2008 to 14 April 2009. X axis – date, y axis – left: flow rate, right: daily precipitation totals, left: air temperature, right: *SWE*. In the legend: precipitation, simulated flow rate, observed flow rate, air temperature, *SWE*.

Fig. 8 – Snow water equivalent in selected subbasins in the 2008/2009 winter. In the legend: simulated *SWE*, observed *SWE*.

Pracoviště autorů: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43, Praha 2; email: kutlakova.lucie@seznam.cz, jenicek@natur.cuni.cz.

Do redakce došlo 14. 12. 2010; do tisku bylo přijato 2. 11. 2011.

Citační vzor:

KUTLÁKOVÁ, L., JENÍČEK, M.: (2012): Modelování akumulace a tání sněhu v povodí Bystřice v Krušných horách. *Geografie*, 117, č. 1, s. 110–125.