

SROVNÁNÍ MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ SEMIDISTRIBUOVANÝCH A DISTRIBUOVANÝCH SRÁŽKOOTOKOVÝCH MODELŮ V LESNICKÉ HYDROLOGII NA PŘÍKLADU POVODÍ OSTRAVICE

COMPARISON OF POSSIBILITY TO USE SEMIDISTRIBUTED AND DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODELS IN FOREST HYDROLOGY ON THE EXAMPLE OF OSTRAVICE CATCHMENT

JAN UNUCKA¹⁾ - MILAN JAŘABÁČ²⁾ - VERONIKA ŘÍHOVÁ¹⁾ - MICHAELA HOŘÍNKOVÁ¹⁾ - JOZEF RICHNAVSKÝ¹⁾ - BORIS ŠÍR¹⁾
 MARTIN ADAMEC³⁾ - DUŠAN ŽIDEK⁴⁾ - ONDŘEJ MALEK¹⁾ - MARTIN ĎURICHA¹⁾ - MICHAL PODHORÁNYI¹⁾ - PETER BOBÁL¹⁾
 BRANISLAV DEVEČKA¹⁾ - VLADIMÍRA KOLÁŘOVÁ¹⁾ - VLADIMÍR TĚTHAL¹⁾ - MARIE VYLEŽÍKOVÁ¹⁾ - IVAN MUDROŇ¹⁾ - PETER SPÁL⁵⁾

¹⁾Hornicko-geologická fakulta, VŠB - Technická univerzita Ostrava

²⁾Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady

³⁾Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita

⁴⁾Český hydrometeorologický ústav - pobočka Ostrava

⁵⁾Stavební fakulta, STU Bratislava

ABSTRACT

Effect of forest rainfall-runoff conditions and erosion processes often raises the debate among scientists and on the other hand, it largely affects a land use planning. This effect also confirms long-term hydrologic conditions and erosion processes on small forest catchments. This method is traditional in the studied landscape relationships. In situations, where we want to follow these processes on a larger scale, above the spatial scale of small forest basins, and in situations where we want to simulate and predict possible scenarios, it is possible to use analytical tools like geographic information systems (GIS) and numerical hydrologic models - the rainfall-runoff models, hydrodynamic models and dynamic erosion models. The capabilities of these tools are established on the Ostravice River for real hydrosynoptic situations. Several rainfall-runoff episodes and normal regional rainfall with low saturation of convective watershed and torrential rainfall with higher saturation basin were selected. Results were obtained using different methods of transformation in the hydrological basin scale (Horton, Green-Ampt, SCS-CN) and semidistributed (HYDROG, HEC-HMS), and distributed models (SIMWE, MIKE SHE) confirm the impact of rainfall on forested land-runoff relations. Final testing of the model shows good agreement for semidistributed and distributed models.

Klíčová slova: Ostravice, lesnická hydrologie, hydrologické modelování, srážkoodtokový proces, GIS, HEC-HMS, HYDROG, MIKE SHE, SIMWE

Key words: Ostravice, forest hydrology, hydrologic modelling, rainfall-runoff process, GIS, HEC-HMS, HYDROG, MIKE SHE, SIMWE

ÚVOD

Oblast střední Evropy bývá přirozeně postihována povodňovými událostmi. V posledních letech dochází k nárůstu povodňových škod především v socioekonomické sféře krajiny. Tato skutečnost je způsobena z části zvyšující se intenzitou a častějším výskytem významných srážkových událostí vedoucích k povodním. Z části spadají zvýšené povodňové škody na vrub nevhodnému využití krajiny, pod které lze zařadit špatně situovanou zástavbu a infrastrukturu, nevhodné využití půdy či nevhodně provedené úpravy toků. Vzhledem k praktické neproveditelnosti návratu povodí do přírodního stavu s výskytem klimaxových fytocenóz, což samo o sobě neznamená absolutní snížení rizika vzniku povodní, zůstává otázkou, jakými jinými opatřeními lze snížit povodňové škody. Praxe ukázala, že rozhodující význam pro tento záměr má správná a včasná předpověď mimořádných srážkoodtokových situací, což dokládají varovné systémy krizového řízení, které na předpovědní složku kladou hlavní důraz.

Jako nejefektivnější v otázce meteorologických a hydrologických předpovědí se ukázaly numerické předpovědní modely. Jejich další výhodou je jejich vzájemná komunikace a komunikace s dalšími (geo)informačními technologiemi. Nejčastěji se využívá pro předzpracování informací a výslednou prezentaci výsledků geografických informačních systémů (GIS). Trendem poslední doby je zvyšování míry propojenosti mezi jednotlivými numerickými výpočetními modely a GIS. Tato snaha je realizována jak prostřednictvím možností numerických modelů pracovat s GIS formáty, popř. používat GIS extenzi, tak díky samotným GIS platformám, které v sobě stále častěji zahrnují škálu hydrologických funkcí a analýz.

Cílem této práce je představit základní přehled numerických hydrologických modelů, které nacházejí své využití v lesnické praxi. Při výběru popisovaných produktů je brán zřetel jak na technickou úroveň a možnosti níže popsanych modelů, tak jejich rozšíření v České republice a ve světě, úroveň dokumentace a přístupnost těchto modelů. Z hle-

diska účelu použití se tato práce věnuje především popisu srážkoodtokových numerických modelů, které řeší transformaci atmosférické srážky na odtok, popř. akumulaci vody v povodí.

Pro využití v lesnické hydrologii jsou v práci hodnoceny vybrané semidistribované numerické modely využívané díky příznivému poměru mezi přesností a rychlostí výpočtu v operativní předpovědní hydrologii a distribuované numerické modely, které se lépe hodí pro podrobné analýzy časových a prostorových proměn srážkoodtokových procesů v měřítku povodí. Vstupní a kontrolní data pro zjištění důležité role lesního porostu ve srážkoodtokovém procesu s využitím numerických modelů byla získána ze zalesněných lesnických experimentálních povodí Červík a Malá Ráztoka. Analýze byly podrobeny především srážkově bohaté a suché epizody pro zviditelnění role lesa ve srážkoodtokovém procesu. V práci jsou u vybraných numerických modelů vyobrazeny výstupy výsledků prezentované s využitím GIS.

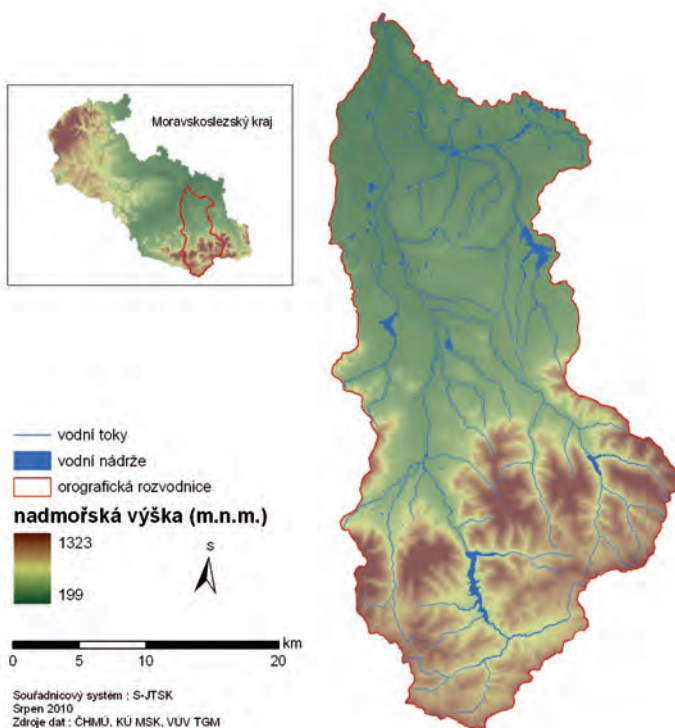
V hydrologické praxi jsou rovněž hojně využívány hydrodynamické modely řešící transformaci vody v korytě toku; v lesnické praxi nacházejí využití též dynamické erozní modely řešící erozi, transport a akumulaci sedimentů v návaznosti na srážkoodtokový proces. Podrobnější informace o hydrologických numerických modelech i v kontextu lesnické hydrologie lze získat z prací CHANGA (2006), HEWLETTA (1986), HAANA et al. (1994), KANTORA et al. (2003), BEVENA (2002, 2009), WAINWRIGHTA a MULLIGANA (2004), SINGHA a FREVERTA (2005) nebo BÍBY, JAKUBOWSKÉHO et al. (2008). Propojení GIS a numerických hydrologických modelů je popsána v knize od MAIDMENTA et al. (2000, 2002).

Povodí řeky Ostravice (hydrologické pořadí 2-03-01) je typickým karpatským flyšovým povodím, které zabírá rozlohu 826,7 km² (viz obr. 1). Nižší položené části povodí společně s nížními oblastmi větších toků jsou tvořeny čtvrtohorními fluvialními a deluviofluvialními sedimenty. Z hlediska geomorfologické klasifikace spadá téměř celé zájmové území do systému Vnějších Západních Karpat, pouze dolní část povodí zasahuje do soustavy Vněkarpatských sníženin (Ostravská pánev). Řeka Ostravice představuje hlavní hydrografickou osu regionu a vzniká soutokem Bílé a Černé Ostravice pramenících pod hřebenem Západních Beskyd v nadmořské výšce 920 a 940 m. Bílá Ostravice je z obou zdrojnic tou delší, a tudíž je hlavním tokem. Řeka unáší významné množství splavenin. Z tohoto důvodu se označuje jako typicky šterkonosný tok beskydského pohoří. Samotnou Ostravici i ostatní horské toky od jejich pramene až po pravostranný přítok, řeku Morávku, lze z hydrologického hlediska považovat za bystrinu, a to pro její relativně vysoký spád. Projevem vysokého gradientu je v obdobích vyšších vodních stavů intenzivní břehová i dnová eroze.

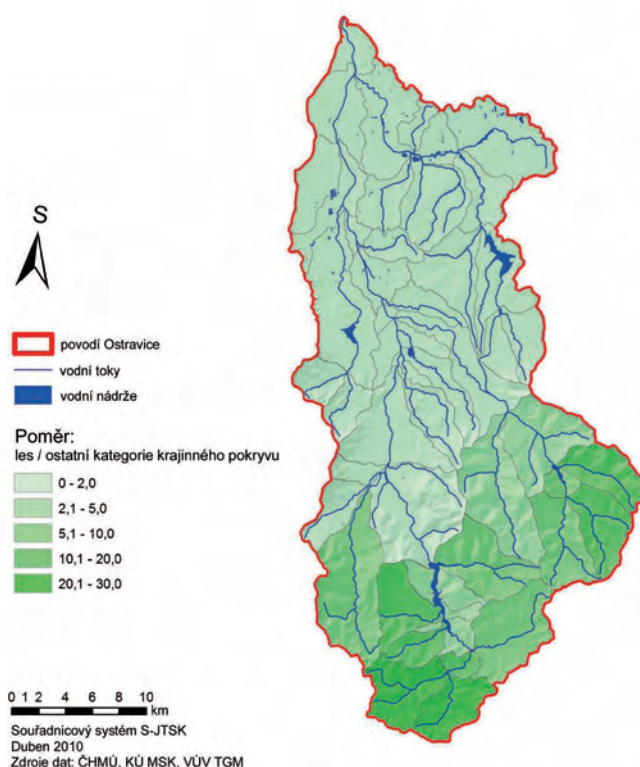
Horské partie povodí náleží klimatickým oblastem CH4, CH6 a CH7, zatímco nížiny patří do MT2, MT9 a MT10. Roční úhrn srážek ve vyšších nadmořských výškách přesahuje 1 000 mm; v nížinách se jedná o hodnotu cca 750 mm. Letní srážkové úhrny v nejvýše položených oblastech přesahují 400 mm.

Z hlediska pedologické charakteristiky povodí je jeho horní část tvořena silně kyselými kambizeměmi, které se ve střední části a nižší části zejména v okolí vodních toků střídají s fluvizeměmi (naplavenými půdami), lokálně s nivními půdami glejovou. Na sprašových hlínách nižších partií lze nalézt illimerizované půdy a pseudogleje. Dále jsou

CHARAKTERISTIKA POVODÍ OSTRAVICE



Obr. 1
Hypsografické a hydrografické podmínky povodí Ostravice
Ostravice watershed hypsographic and hydrographic conditions



Obr. 2
Podíl lesních porostů k ostatním kategoriím krajinného pokryvu v povodí Ostravice
Proportion of forest to other classes of land cover in the Ostravice basin

zde zastoupeny kambizemě (hnědé lesní půdy) typické a pseudoglejové. Pro dolní části větších vodních toků je charakteristický výskyt fluvizemě typické a glejové (WEISSMANOVÁ et al. 2004).

Krajinný pokryv je jedním z významných aspektů, které ovlivňují srážkoodtokové a erozní procesy probíhající na povodí. V horní části povodí, která patří do karpatského oreofytika, převažují smrkové jehličnaté lesy s příměsí ostatních druhů dřevin (zejména *Fagus sylvatica* a *Abies alba*). S klesající nadmořskou výškou, v oblasti mezofytika, je tento typ krajiny vystřídán zemědělskou krajinou s výrazným zastoupením přirozené vegetace (viz obr. 2). Lesním porostům dominují méně vhodné druhy. Původní jedlo-bukové lesy byly nahrazeny smrkovými (*Picea abies*). Z celkové rozlohy povodí Ostravice zaujímají lesy 55 % plochy (HOLUŠA 2000, WEISSMANOVÁ et al. 2004).

Podle dat z ČHMÚ dosahuje průměrný průtok ve vodoměrných profilech řeky Ostravice těchto hodnot: Staré Hamry $1,51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Sviadnov $11,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a Slezská Ostrava $15,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Rozkolísanost průtoků je v tomto povodí velmi výrazná; v některých případech přesahuje hodnoty 1 : 2000. Hodnoty m-denních a N-letých vod jsou ovlivněny vodními díly. To způsobuje, že na závěrovém profilu Slezská Ostrava je neovlivněná hodnota Q_{100} $1\,124 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, zatímco ovlivněná $840 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Stejná rozkolísanost platí také pro Q_{364d} , kde neovlivněná hodnota dosahuje $1,34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a ovlivněná $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (WEISSMANOVÁ et al. 2004).

CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

HEC-HMS

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) byl vyvinut hydrologickým inženýrským centrem Americké armády (HEC-USACE, založeno v roce 1964) pro studium srážkoodtokových procesů v povodí (BEDIENT, HUBER, VIEUX 2007). Je navržen tak, aby byl použitelný pro různé zeměpisné oblasti. HEC-HMS je pokračovatelem modelu HEC-1, který byl vytvořen v roce 1967. Jedná se o průmyslový standard a validovaný s-o model agentury FEMA (Federal Emergency Management Agency, viz http://www.fema.gov/plan/prevent/fhm/en_hydro.shtm). HEC-HMS disponuje přehledným grafickým uživatelským rozhraním a implementací pokročilých metod pro hydrologickou a hydraulickou transformaci s-o procesů. Grafické uživatelské rozhraní umožňuje plynulý pohyb mezi jednotlivými částmi programu. Program je zdarma ke stažení na stránkách HEC-USACE <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Kromě samotného programu je na stránkách ke stažení jeho bohatá dokumentace (uživatelský a technický manuál, případové studie), ale mimo to i manažer časových řad HEC-DSSVue a HEC-GeoHMS, jenž slouží pro předzpracování (preprocessing) dat v prostředí GIS. Základními prvky, které tvoří uživatelské rozhraní, jsou basin model (obsahuje samotnou schematizaci povodí), meteorologic model (popisuje rozmístění srážek na povodí), control specifications (časový interval a parametry simulace) a input data (např. data časových řad jako jsou srážky, průtoky, teploty, různá rastrová data a další). Z těchto komponent se pak sestaví běh výpočtu simulace (simulation run). Díky tomuto řešení je možné komponenty libovolně kombinovat, což podporuje možnost simulace různých scénářů.

HYDROG

HYDROG je software, který byl primárně navržen pro potřeby operativní praxe, kde se již etabloval a osvědčil. Je tedy určen pro simulaci, operativní předpovědi a operativní řízení odtoku vody z povodí z příčinné přívalové nebo regionální srážky, resp. odtoku způsobeného táním sněhové pokrývky.

Tento software byl vyvinut profesorem Milošem Starým z VUT v Brně (vývoj probíhá od roku 1991) a v současnosti existuje ve verzi 9.1 (STARÝ 1998). Není volně k dispozici a funguje pouze s licencovaným hardwarovým klíčem. HYDROG je nasazen v operativním provozu na mnoha povodích České republiky. V ČHMÚ je používán pro výpočet předpovědi na regionálních předpovědních pracovištích v Ostravě (povodí Odry a Horní Moravy) a v Brně (pro povodí Dyje), v rámci podniku Povodí je používán zejména na povodích Odry, Labe, Vltavy a Ohře.

Schematizace povodí je v modelu HYDROG řešena pomocí orientovaného ohodnoceného grafu G (N, H, P), který nahrazuje skutečné povodí. N zde představuje množinu vrcholů grafu (uzly grafu), H množinu hran grafu (vodních toků) a P množinu tzv. zavěšených ploch (subpovodí převedených na obdélníky) na hrany grafu. Vrcholy grafu pak představují bodové zdroje vody (přítoky do povodí, odběry vody, uzly s akumulací – vodní nádrže). Z toho všeho vyplývá, že topologické, geometrické, hydrologické a hydraulické parametry jsou pro každý prvek množiny konstantní. Jedná se tedy o semidistribuovaný model.

V průběhu řešení srážkoodtokového procesu jsou uvažovány dva druhy transformací – hydrologická a hydraulická. Pro hydrologickou transformaci na povodí je použita metoda Hortona. Je nazvána podle svého objevitele Roberta Hortona (1933). Metoda Hortona konceptuálně řeší infiltraci ovzdušné srážky a výšku efektivní srážky, tj. srážky vyvolávající povrchový odtok (BEVEN 2002, STARÝ 2005). Je nenáročná na parametry a vychází zejména z hydraulických vlastností půdy. Hlavní výhodou modelu HYDROG s ohledem na operativní praxi lze spatřit v použití kalibračních koeficientů. Kalibrační koeficienty upravují výsledky modelu bez přímého zásahu do schematizace. Jedná se tedy o přepočtení koeficienty pro numerické řešení s-o procesu. Kromě tohoto mechanismu HYDROG disponuje poloautomatickou a automatickou kalibrací parametru zavěšených ploch a podzemních nádrží (lineární metoda).

SIMWE

SIMWE (SIMulated Water Erosion) je hydrologický a erozní open source model. Je součástí GRASS a navazuje na rastrový modul r.sim.water GRASS. Původní modul r.sim.water pro verze 5.x GRASS byl k dispozici jako doplňkový modul, který bylo nutno zkompileovat. V současnosti je v GRASS od verze 6.2.2 implicitně zahrnut jako modul SIMWE v nástrojích hydrologických analýz spolu s modelem SIMWE. Pro dané typy analýz se jedná o poměrně výkonný a robustní model. Mezi jeho hlavní výhody patří zejména víceměřítková simulace (multiscale simulation) (NETELER, MITASOVA 2010, FÁREK, UNUČKA 2010), která umožňuje v základním modelu s menším rozlišením pro celé území současně detailně řešit vybrané části území. Princip spočívá ve vícenásobném výpočtu simulací od nejhrubšího rozlišení pro celé území až po nejjemnější rozlišení vybraného segmentu pomocí tzv. vzorkovacích bodů (walkers). Podrobnější informace o modelu SIMWE lze nalézt na: http://www.grass.itc.it/grass62/manuals/html62_user/r.sim.water.html.

MIKE SHE

MIKE SHE představuje distribuovaný s-o model pro simulaci všech hlavních procesů v zemní fázi hydrologického cyklu od srážek až po odtok vody z povodí, a to přes povrchový odtok, podzemní odtok, tání sněhu, evapotranspiraci a další procesy. Model je vhodný pro analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, povodí a životního prostředí. Má širokou oblast uplatnění při posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou a při řešení zásadních technických zásahů v povodí.

MIKE SHE vychází z modelu SHE (Système Hydrologique Européen), který byl od roku 1977 vyvíjen konsorciem tří evropských organizací: The Institute of Hydrology (Velká Británie), SOGREAH (Francie) a DHI Water & Environment (Dánsko). Insitut DHI (Danish Hydraulic Institute) pak od poloviny 80. let minulého století začal dále tento model rozvíjet jako součást řešení komplexní platformy hydrodynamických a s-o modelů v podobě MIKE Zero (BEVEN 2002, SINGH, FREVERT 2005).

Na rozdíl od modelu HYDROG a HEC-HMS je model MIKE SHE příliš komplexní na straně vstupu a metodik, byť existují mechanismy pro zjednodušení výpočtu vypnutím určitých výpočetních modulů či parametrizací určitých procesů. Z toho vyplývá, že pro operativní provoz v rámci hydrologické prognózy se hodí méně než oba jmenované modely, kdežto pro bilanční analýzy a management povodí se tento program svým zaměřením hodí dokonale.

Povrchový odtok je v tomto modelu řešen pomocí difuzní aproximace Saint Venantových rovnic a Manningova vztahu. Pohyb vody v korytech je řešen napojením na 1D model MIKE 11. Propojení modelu MIKE SHE a MIKE 11 mimo jiné umožňuje 1D simulace říčních toků a vodních stavů pomocí Saint Venantových rovnic, simulaci široké škály objektů jako například jezů a propustků, modelování inundačních oblastí a další. Evapotranspirace je řešena metodou KRISTENSEN-JENSEN (1975 in MAIDMENT 1993). Kromě této metody se ještě uplatňuje zjednodušený dvouvrstvý model, kdy je půdní profil rozčleněn na svrchní vrstvu (zde se uplatňuje faktor RDF – Root distribution function a dochází k odčerpávání půdní vody kořeny rostlin) a spodní vrstvu, kde k těmto procesům nedochází. Toto řešení vyžaduje data o vegetačním krytu (index listové plochy – LAI index a hloubku kořenů – rooting depth) a fyzikální vlastnosti půdy. Pro pohyb vody v nenasycené zóně se využívají Richardsovy rovnice nebo jejich zjednodušené podoby, jejichž aplikace pak výrazně zkracuje čas výpočtu. Podzemní

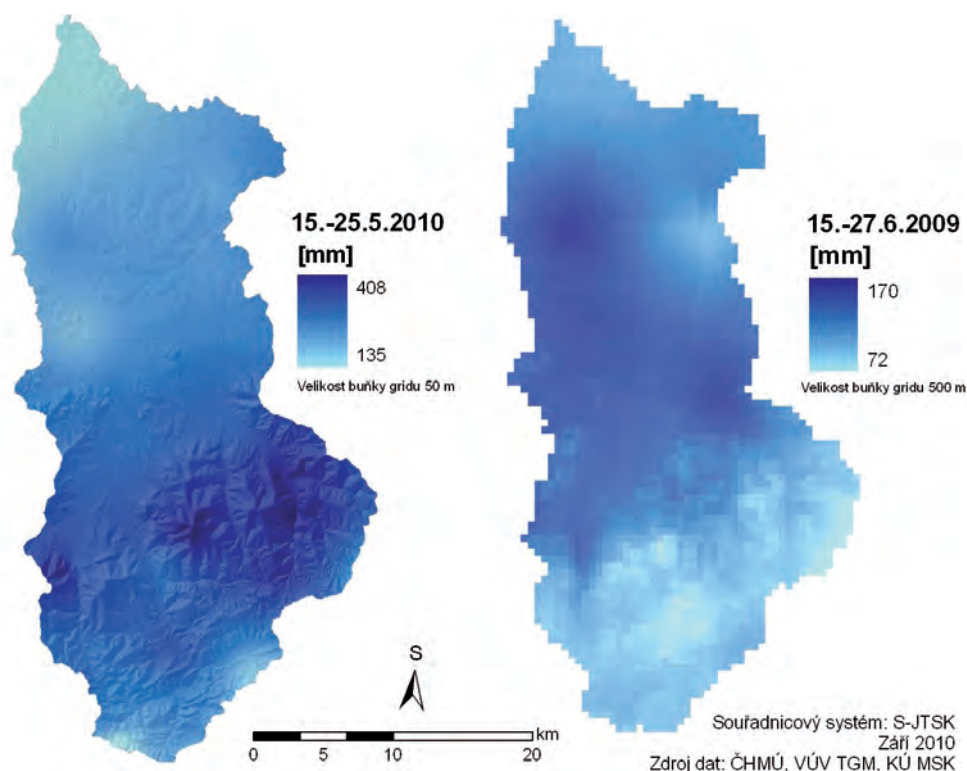
odtok a nasycená zóna je řešena pomocí implicitní metody konečných prvků v 3D řešení. Velmi podrobný popis všech výše uvedených metod je možné najít v technickém manuálu MIKE SHE. Jsou zde podrobně rozepsány příslušné rovnice a doplněné názornými obrázky.

Popis vybraných epizod

Epizoda 15. – 27. 6. 2009

V poslední dekádě měsíce června se vytvořila situace, při které se k nám od východu dostával vlhký a teplý vzduch. Tyto situace jsou v letním období méně časté. Ve střední Evropě v této části roku všeobecně spíše převládá přenos vzduchových hmot od západu na východ. V uvedeném případě šlo o tzv. východní cyklonální situaci (Vc), kdy se kolem středu tlakové níže nad Středozemním mořem (Balkánským poloostrovem) dostává do střední Evropy vzduch nasycený vodní parou ze Středomoří nebo i z oblasti Černého moře. Tlaková níže se středem nad Balkánským poloostrovem zůstávala téměř bez pohybu na stejném místě až do konce měsíce, po jejím severním okraji k nám proudil teplý a velmi vlhký vzduch od Černého moře ve všech hladinách atmosféry. Úvod období je možno vymezit teplou frontou dne 22. 6., která přes naše území přešla od východu. V následujícím období od 23. 6. byla denně zaznamenána v regionu bouřková činnost, místy i s velmi intenzivními srážkami, které způsobily na několika místech velmi rychlé a velmi ničivé povodně. Vývoj synoptické situace 22. – 24. 6. je znázorněn na obrázku 4.

24hodinové srážkové úhrny se pohybovaly od 20 do 50 mm. Nepříznivou situaci podpořila také vysoká relativní vlhkost vzduchu, která dosahovala 90 – 95 %, což je téměř dvojnásobek běžných hodnot relativní vlhkosti v letních měsících. Začátkem července se začala vlhkost vzduchu opět postupně vracet k normálu.



Obr. 3

Srážkové úhrny pro epizodu červen 2009 a květen 2010
Total rainfall depth for the episode in June 2009 and May 2010

Společně s intenzivním deštěm z konvektivní oblačnosti i v průběhu dalších dnů dosáhla úroveň hladin řek v Moravskoslezském kraji až na 3. SPA. Lokálně se také vyskytovaly příválové deště s celkovým úhrnem srážek kolem 100 mm (viz obr. 3).

Povětrnostní situace se vyskytovala po celé období trvání na přelomu června a července 2009 a způsobila téměř čtrnáctidenní období se silnými bouřkami nejen v České republice, ale i v jejím širším okolí.

Epizoda 15. 5. – 5. 6. 2010

V polovině měsíce května se nad Itálií rychle prohloubila nová tlaková níže a začala postupovat k severovýchodu nad Maďarsko a Slovensko. V dalších dnech mezi 16. až 19. 5. setrvávala tlaková níže víceméně bez pohybu nad východním Slovenskem, Polskem a západní Ukrajinou. Na naše území začal po její zadní straně od severovýchodu proudit chladný a velmi vlhký vzduch. Proudění kolem středu této níže přineslo intenzivní srážky na Slovensko, do Polska a také na severovýchod ČR, především na území Moravskoslezského kraje. V oblasti Beskyd byla intenzita srážek podpořena návětrím pohoří (severní a severovýchodní svahy) a také střihem větru (severovýchodní proudění ve vyšších vrstvách atmosféry, severozápadní proudění při zemi). Tento typ synoptické situace je pro vznik povodní ve střední a východní Evropě velmi charakteristický a příhodný, podobná situace byla příčinou vzniku velkých povodní v posledních letech (1997, 2002 aj.). Úhrny srážek na radarových snímcích ze 17. a 18. 5. je možné vidět na obrázku 5.

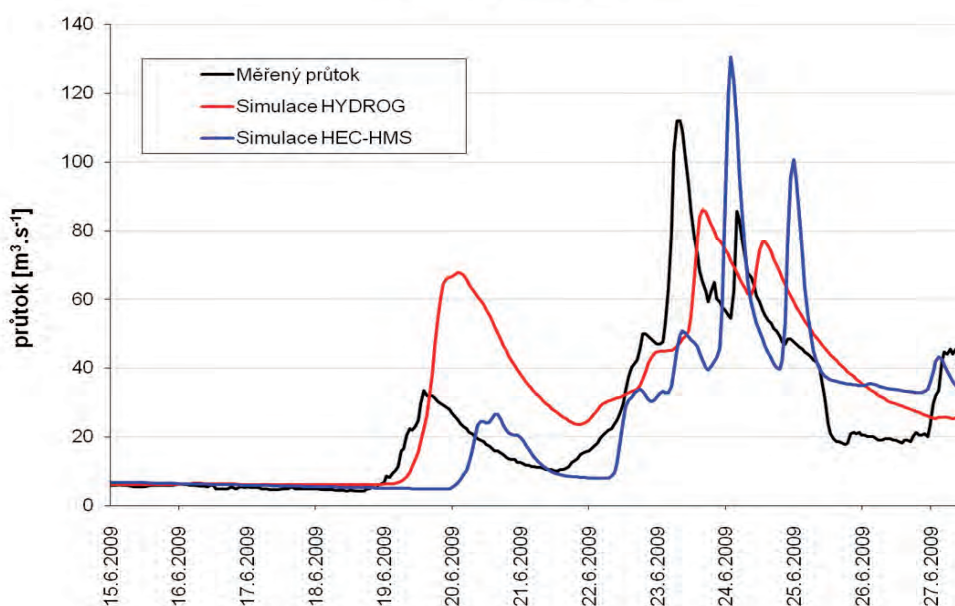
Dne 21. května přešla přes naše území k jihozápadu teplá fronta. Za ní k nám začal proudit od severovýchodu teplý a vlhký instabilní vzduch. Začaly se tvořit četné přeháňky a bouřky s 24hodinovými úhrny srážek až kolem 25 mm. V dalších dnech se tlaková níže nad východní Evropou vyplňovala, proměnlivé počasí s přeháňkami a bouřkami stále přetrvávalo i v prvním červnovém týdnu.

VÝSLEDKY

Z výsledného hydrogramu simulací epizody 15. – 27. června 2009 v semidistribuovaných modelech HEC-HMS a HYDROG, který je zobrazen grafem 1, je již na první pohled patrné, že šlo o velmi výjimečnou srážkovou událost, viz výše. Jednalo se o příválovou srážku, tedy výjimečnou událost lokálního charakteru, která je většinou hůře zachytitelná sítí srážkoměrných stanic a může dojít k odtoku vody mimo koryta toků. Přesto si modely poradily i s touto událostí poměrně dobře. Model HYDROG lépe zachytil objem povodňové vlny, ale nadhodnotil první kulminaci takřka o $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Oba modely zachytily oba hlavní kulminační průtoky, byť oba modely reagovaly oproti měřeným hodnotám opožděně.

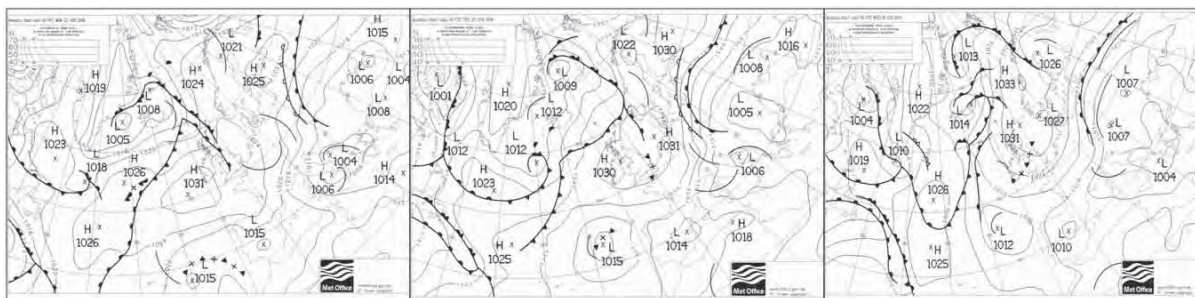
Hydrogram prezentovaný grafem 2 ukazuje výsledky simulací pro epizodu 15. – 25. května 2010. Výsledky jsou vizualizované opět pro profil Slezská Ostrava a porovnávají modelovaný průtok s pozorovaným. Tvar hlavní povodňové vlny vystihují oba modely poměrně přesně, model HEC-HMS vykazuje velmi přesnou shodu v kulminačním průtoku, a to jak z hlediska času kulminace, tak i z hlediska její hodnoty. Model HYDROG oproti tomu lépe zachycuje objem této vlny, který je modelem HEC-HMS mírně podhodnocený. Model HYDROG dobře vystihuje čas kulminace povodňové vlny, její hodnota je však oproti reálnému měřenému průtoku zhruba o $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nižší. Rozkolísanost průtoku na sestupné větvi hydrogramu lépe dokázal zachytit model HYDROG, pracující s metodou Hortonova coby metodou hydrologické transformace na povodí a s metodou lineární nádrže pro základní odtok, naproti tomu HEC-HMS pracující s metodou SCS-CN a recesní metodou pro základní odtok, dílčí kulminace na sestupné větvi víc nadhodnocuje.

Oba výsledné hydrogramy na vybraných simulovaných epizodách dokazují, že použité semidistribuované modely jsou využitelné a vhodné pro srážkoodtokové modelování, převážně pak pro simulaci povodňových situací, kdy modely HYDROG i HEC-HMS dokázaly velmi přesně zachytit čas i velikost kulminace.



Graf 1

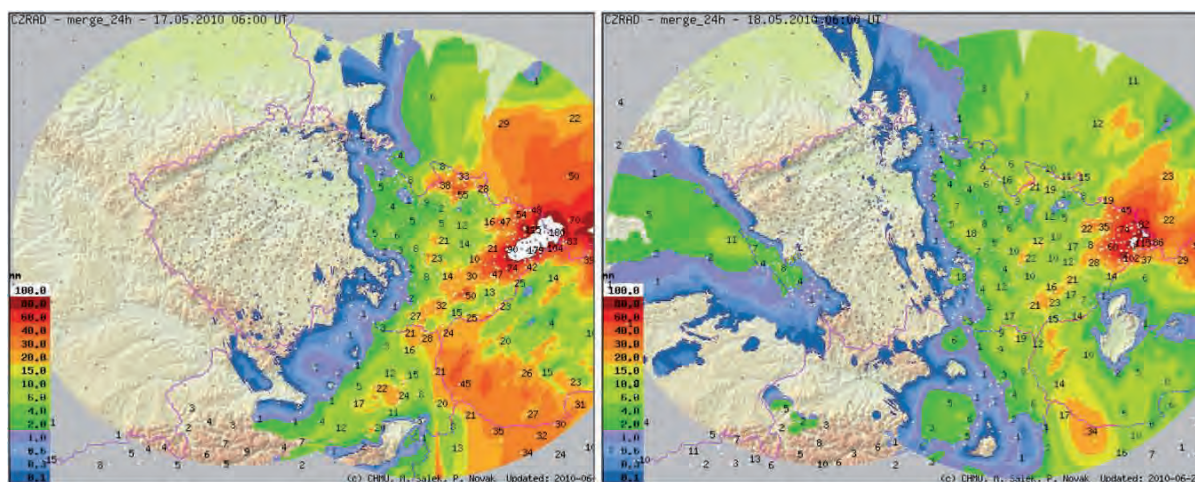
Výsledný hydrogram simulací epizody červen 2009 pro profil Slezská Ostrava
The resulting hydrograph of the June 2009 episode for a profile Silesian Ostrava



Obr. 4

Vývoj synoptické situace 22. – 24. června 2009 nad územím ČR (Zdroj: ČHMÚ)

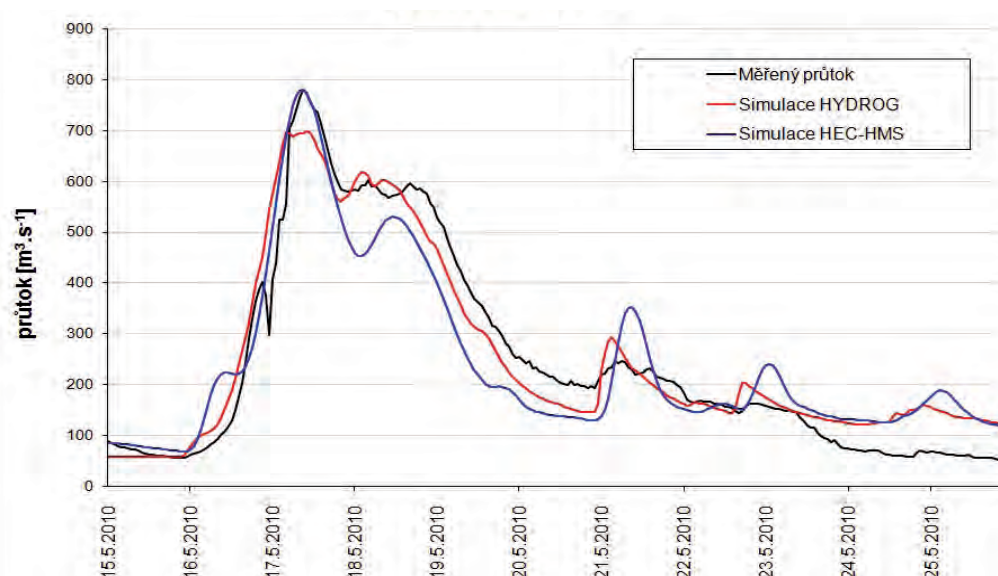
Synoptic situation over the Czech Republic since 22 June until 24 June 2009 (Source: Czech Hydrometeorological Institute)



Obr. 5

Úhrny srážek na radarových snímcích ze 17. a 18. května 2010 (Zdroj: ČHMÚ)

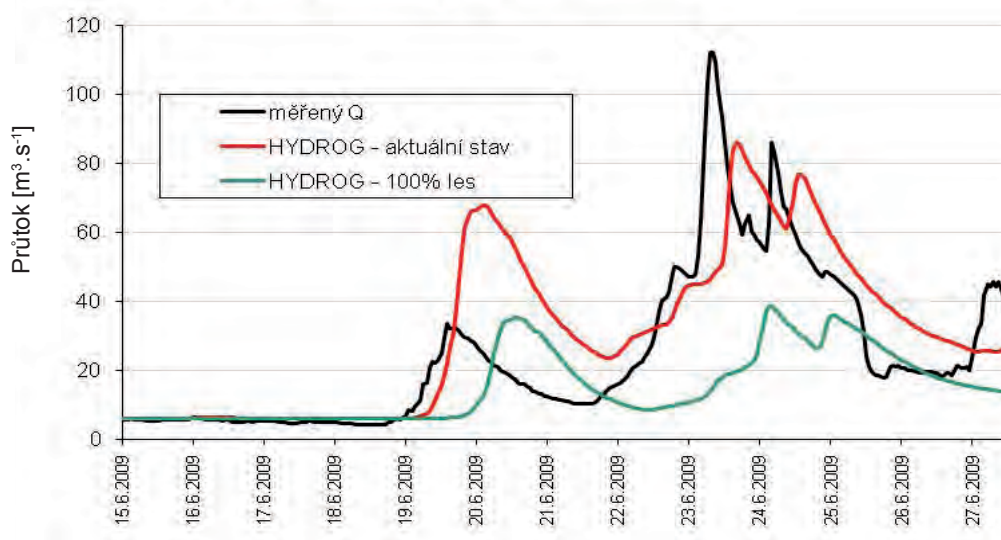
Total precipitation – the radar images from 17 and 18 May 2010 (Source: Czech Hydrometeorological Institute)



Graf 2

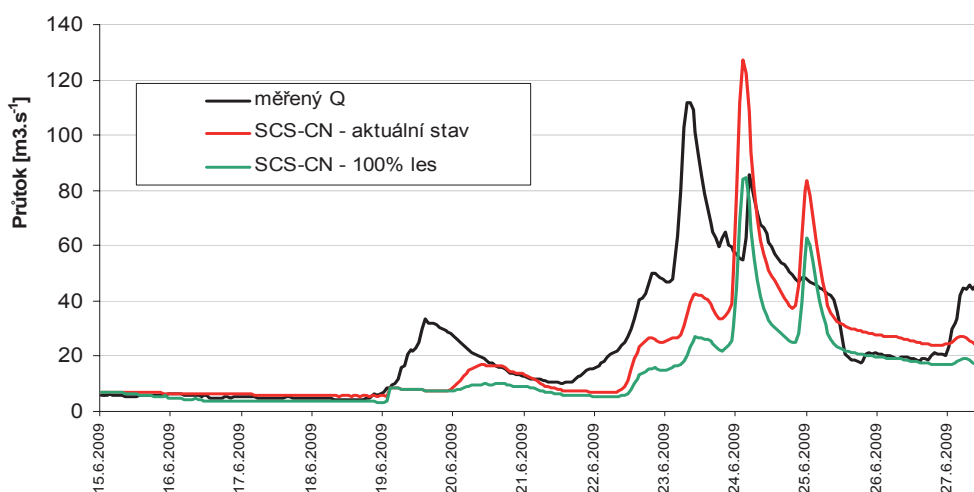
Výsledný hydrogram simulací epizody květen 2010 pro profil Slezská Ostrava

The resulting hydrograph of the May 2010 episode for a profile Silesian Ostrava


Graf 3

Výsledky simulací pro epizodu červen 2009 - model HYDROG

Results of simulations for the June 2009 episode - model HYDROG


Graf 4

Výsledky simulací pro epizodu červen 2009 - model HEC-HMS, metoda SCS-CN

Results of simulations for the June 2009 episode - model HMS, method SCS-CN

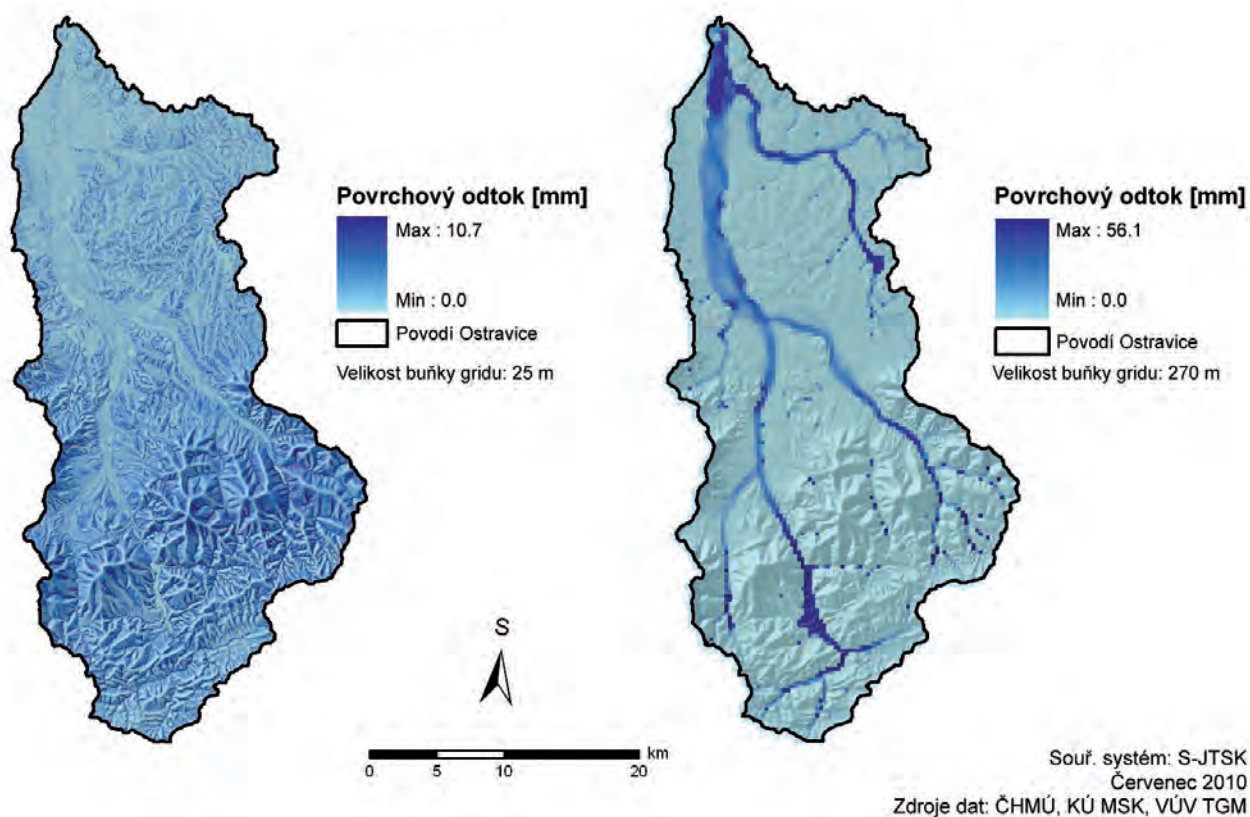
Grafy 3 a 4 porovnávají pro vybrané modely a metody naměřený průtok (zobrazen černou barvou), průtok pro aktuální stav krajinného pokryvu na povodí (červená barva) a průtok pro scénář zalesněného povodí (znázorněn zelenou barvou). Oba tyto výstupy deklarují vliv lesa na odtokové poměry. U grafu 3, kde jsou zobrazeny výstupy z modelu HYDROG, se rozdíl mezi simulovaným průtokem na aktuálním stavu krajinného krytu povodí a na scénáři fiktivního zalesnění povodí pohybuje i kolem $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. U grafu 4, jenž znázorňuje výstupy z modelu HEC-HMS (konkrétně použita metoda SCS-CN), se tento rozdíl pohybuje v maximálním rozdílu kolem $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Výstupy z distribuovaných modelů SIMWE a MIKE SHE jsou demonstrovány na obrázcích 6 až 10. Obrázek 6 zobrazuje povrchový odtok

pro epizodu květen 2010 modelovaný pomocí dvou zmíněných distribuovaných modelů.

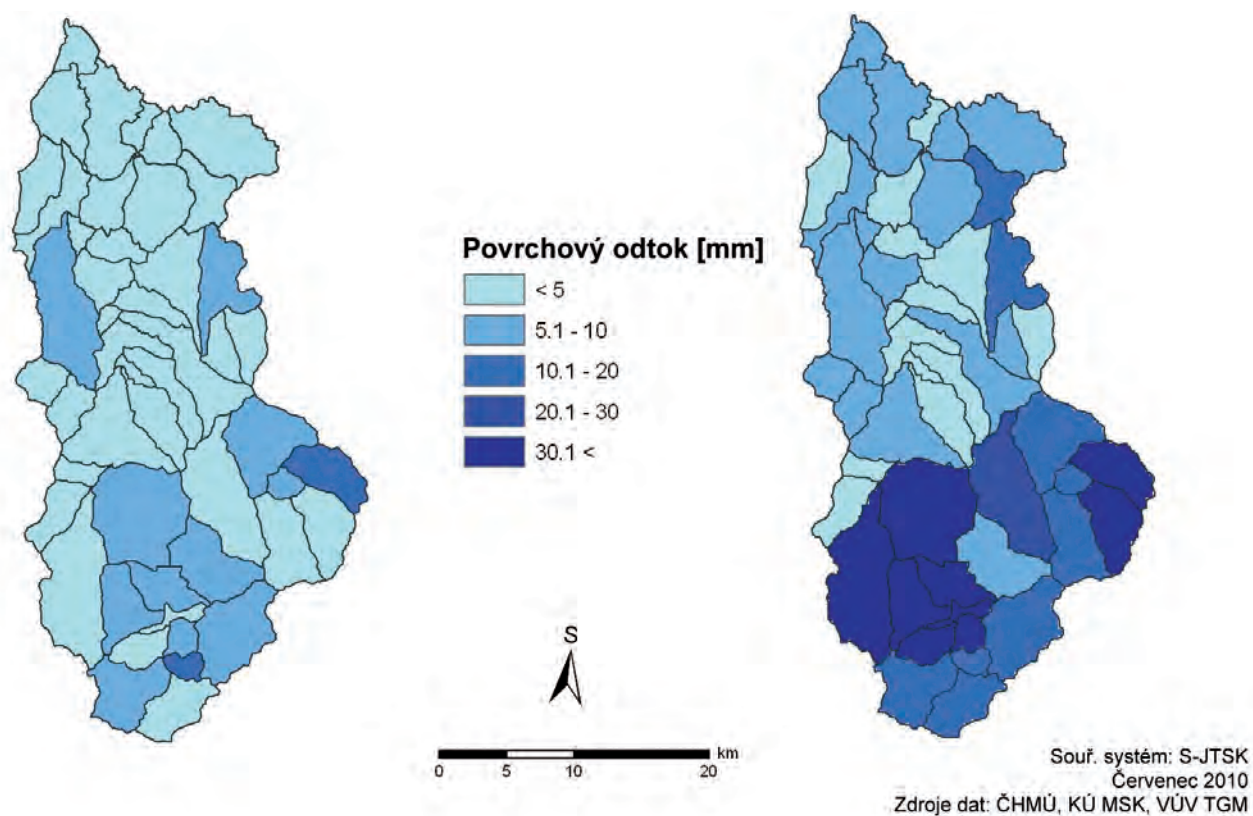
Použitím GIS nástroje zonální statistika byla velikost povrchového odtoku vztažena k jednotlivým schematizovaným subpovodím povodí Ostravice. Velikost povrchového odtoku můžeme vztáhnout pomocí zonální statistiky k jednotlivým subpovodím povodí Ostravice (viz obr. 7).

Dalším typem výstupu může být koeficient odtoku (viz obr. 8). Koeficient odtoku je číselná hodnota udávající poměr mezi výškou odtoku a srážek nebo objemem odtoku a srážek pro danou epizodu, v tomto případě červen 2009.



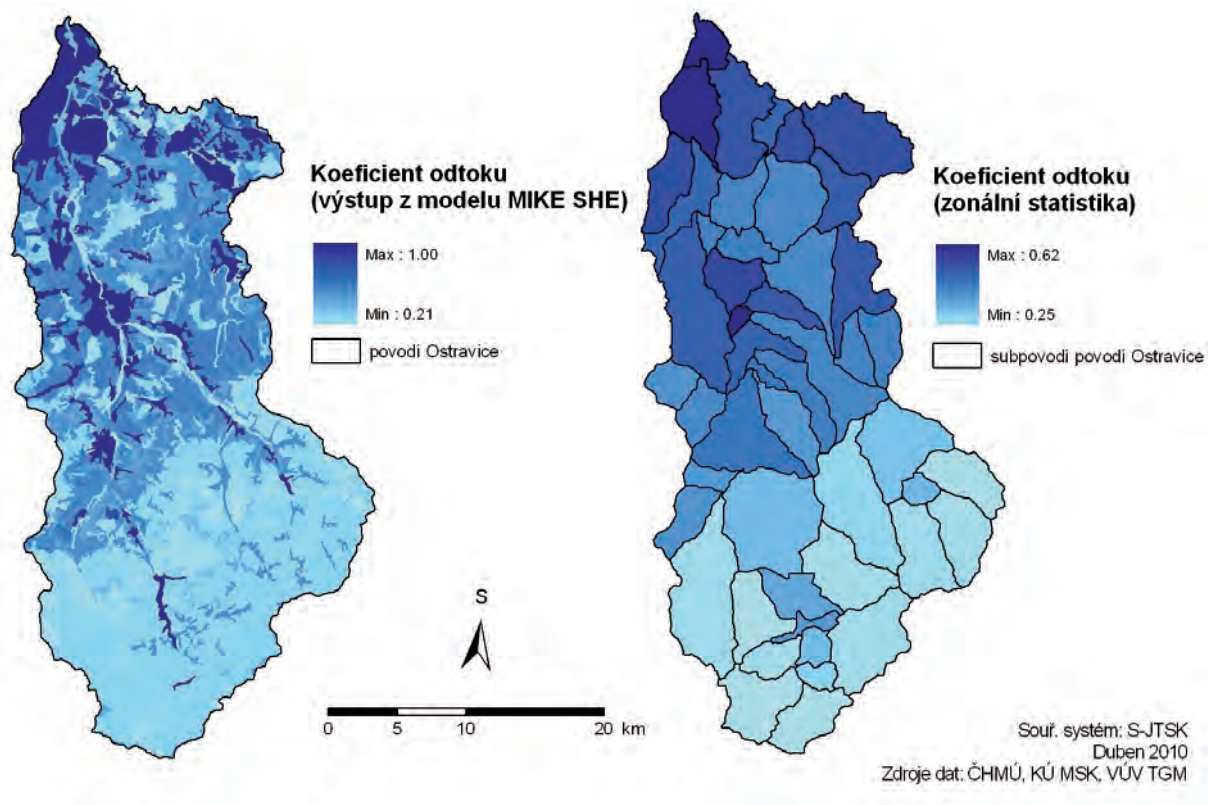
Obr. 6

Výsledky povrchového odtoku modelované pomocí distribuovaných modelů SIMWE a MIKE SHE (epizoda květen 2010)
Results of the surface runoff modeled by MIKE SHE and SIMWE distributed hydrologic models (the May 2010 episode)

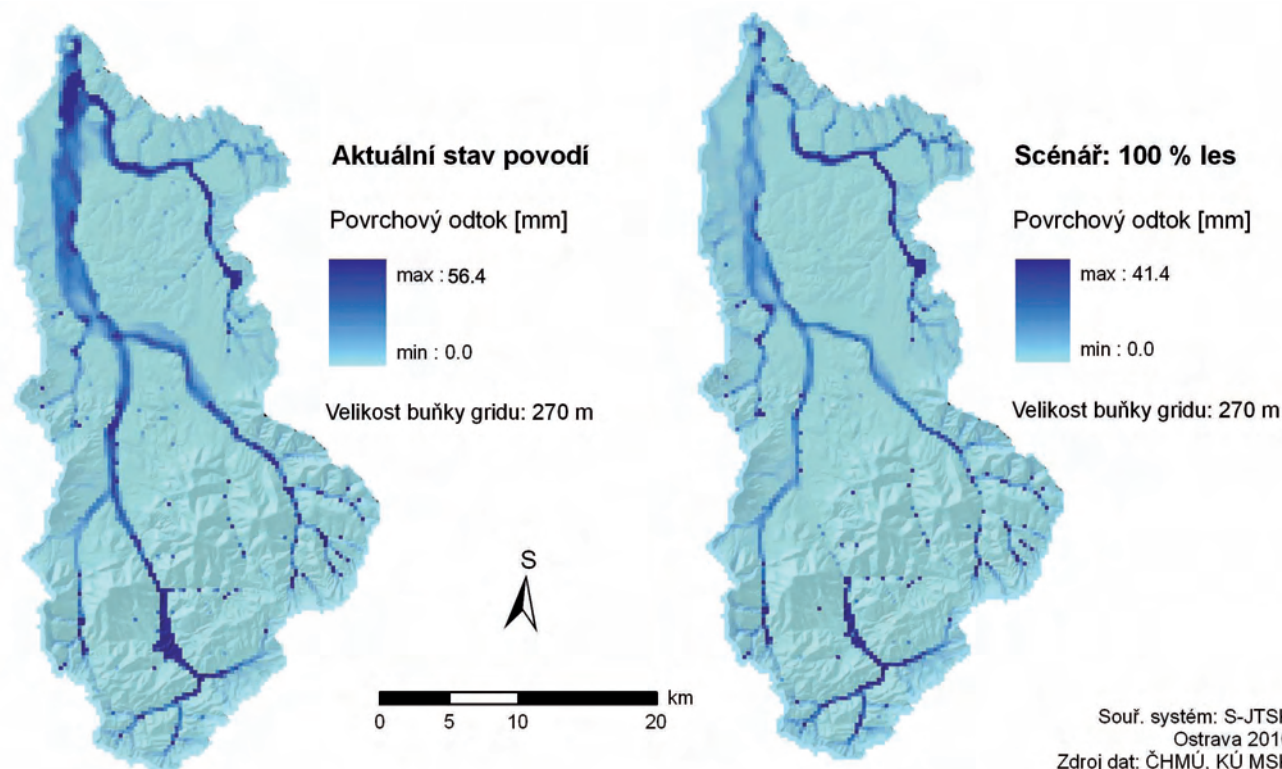


Obr. 7

Povrchový odtok modelovaný pomocí SIMWE a MIKE SHE - zonální statistika (epizoda květen 2010)
The surface runoff modeled by MIKE SHE and SIMWE model- zonal statistic (the May 2010 episode)


Obr. 8

Koeficient odtoku odvozený z výsledků modelu MIKE SHE pro epizodu červen 2009
Runoff coefficient derived from MIKE SHE model results for the June 2009 episode


Obr. 9

Srovnání aktuálního stavu krajinného pokryvu povodí se scénářem stoprocentního zalesnění povodí – výsledky z modelu MIKE SHE pro epizodu červen 2009
Comparison of the current state of land cover on the basin with scenario of absolute afforestation catchment- results from MIKE SHE model for the June 2009 episode

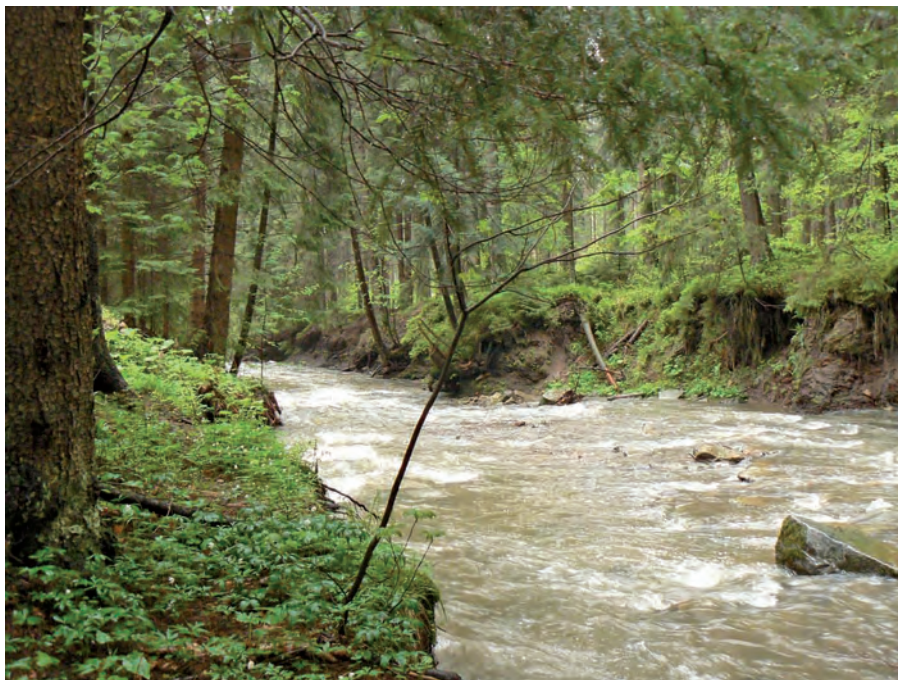


Foto 1

Odtoková situace v korytě Bílé Ostravice 14. 5. 2010 – nad Bedřichovým klauzem (Jan Unucka)

Runoff conditions in the Bila Ostravice river 14. 5. 2010 – upon the Fridrich forestry water reservoir (Jan Unucka)



Foto 2

Povrchový odtok v údolí Bílé Ostravice nad soutokem s Č. Ostravicí – 18. 5. 2010 (Jan Unucka)

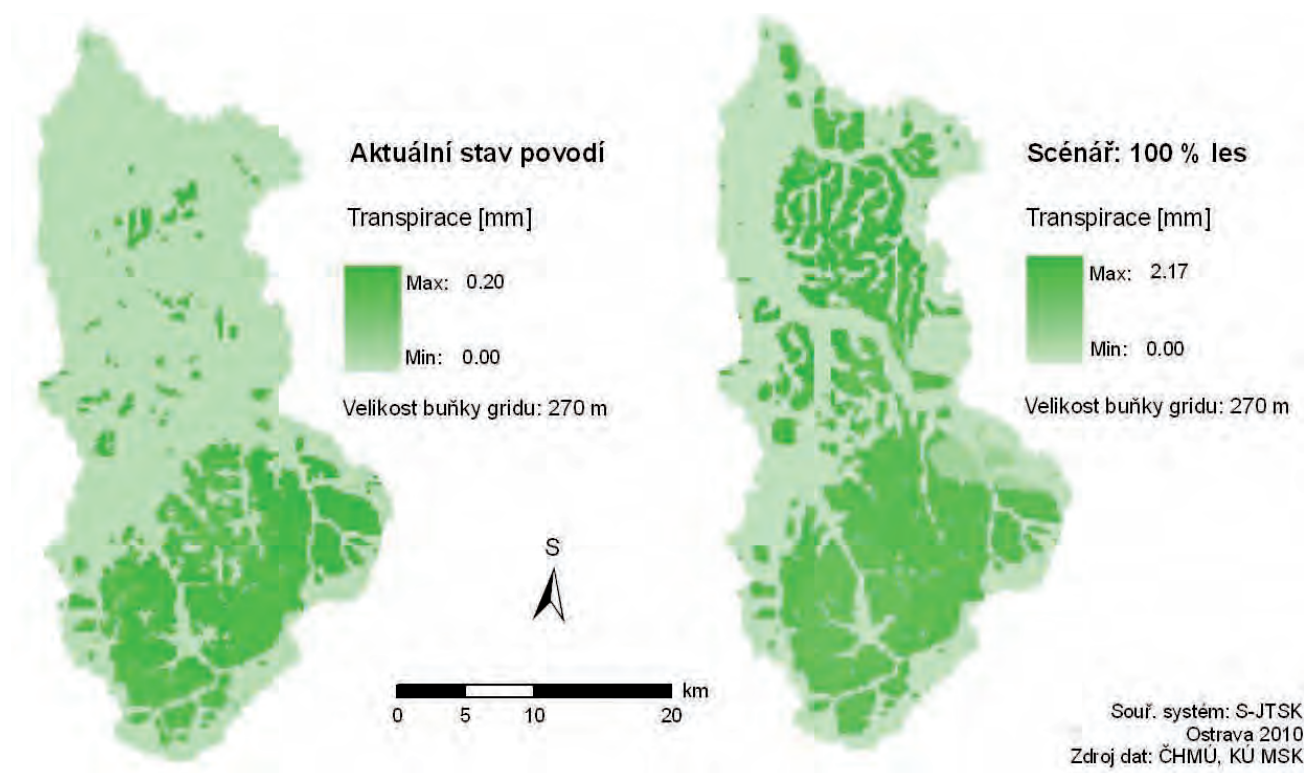
Hortonian overland flow in the Bila Ostravice catchment upon confluence with Cerna Ostravice – 18. 5. 2010 (Jan Unucka)



Foto 3

Povrchový odtok v údolí Bílé Ostravice nad Bedřichovým klauzem 18. 5. 2010 (Jan Unucka)

Hortonian overland flow in the Bila Ostravice catchment upon the Fridrich forestry water reservoir 18. 5. 2010 (Jan Unucka)



Obr. 10
Transpirace modelovaná pomocí modelu MIKE SHE pro epizodu červen 2009
Transpiration modeled by MIKE SHE model for the June 2009 episode



Foto 4
Odtoková situace v korytě Bílé Ostravice 18. 5. 2010 – nad Bedřichovým klauzem (Jan Unučka)
Runoff conditions in the Bila Ostravice river 18. 5. 2010 – upon the Fridrich forestry water reservoir (Jan Unučka)

Obrázek 9 zobrazuje výstup modelu MIKE SHE, kde je porovnáván výsledek aktuálního stavu krajinného pokryvu v povodí (vlevo) s připraveným scénářem fiktivního zalesnění povodí a tedy vlivem lesa na odtokové poměry v povodí (vpravo). Na tomto výstupu je zobrazen povrchový odtok vztahující se k době kulminace epizody červen 2009. Je patrné, že i výstupy z distribuovaného modelu MIKE SHE prokázaly platnost původního předpokladu, že les významnou měrou ovlivňuje odtokové poměry v území (stejně tak jako výstupy z modelu HEC-HMS či HYDROG).

Hodnota povrchového odtoku je však výslednicí mnoha faktorů, které vzájemně spolupůsobí jak v reálném povodí, tak v povodí schematizovaném v rámci komplexního modelu typu MIKE SHE. Změny se projevují i v hodnotách povrchového a hypodermického odtoku, evapotranspirace i intercepce povodí stejně jako infiltrace a perkolace atmosférické srážky. Na obrázku 10 je ukázka výsledku transpirace modelované pomocí modelu MIKE SHE. Evapotranspirace je bezesporu faktorem, který během krátkých s-o epizod má na hodnoty kulminací a objemu odtoku spíše zanedbatelný vliv. Z dlouhodobého či bilančního hlediska se však jedná o faktor významný, proto byl i s přihlédnutím ke komplexnímu přístupu k modelování s-o procesu v rámci schematizace modelu MIKE SHE zahrnut. Detailněji se vlivem změn transpirace, evaporace a dlouhodobých změn hypodermického odtoku či hydrologického režimu půd a půdní ekologie v rámci výzkumných povodí Hubbard Brook a Coweeta zabývají DE LA CRÉTAZ a BARTEN (2007), obecná problematika intercepce a evapotranspirace a jejího modelování v kontextu lesnické hydrologie je také přehledně diskutována v pracích MAIDMENTA (1993), DINGMANA (2002) a CHANGA (2006).

Z výše uvedených důvodů tedy byla zvolena velikost buňky výpočetního rastru na 270 m, protože snížení této hodnoty by sice zpřesnilo prostorovou informaci výstupu modelu, avšak došlo by k enormnímu nárůstu doby výpočtu. Tento nárůst se v praxi často eliminuje změnami metod infiltrace, perkolace a povrchového odtoku, což je však nevhodná úprava vzhledem k danému typu analýz.

ZÁVĚR

Tento příspěvek se zabývá vlivem lesního vegetačního krytu na odtokové podmínky ve vybraném pilotním povodí, tedy v povodí řeky Ostravice (2-03-01). Odtokové podmínky byly zkoumány s pomocí využití nástrojů GIS a semidistribuovaných a plně distribuovaných hydrologických modelů různých typů. Z těchto modelů lze jmenovat: semidistribuované HEC-HMS a HYDROG, plně distribuované MIKE SHE a SIMWE. Tyto modely v kombinaci s nástroji GIS představují účinný nástroj pro studium vlivu krajinné pokrývky; mají tedy nesporný význam i v lesnické hydrologii.

Shoda mezi vypočtenými výsledky a skutečně naměřenými daty (průtoky) byla významná i navzdory různým použitým metodám hydrologické transformace. Z porovnání výsledků modelů vyplývá, že semidistribuované modely jsou vhodné především pro operativní hydrologickou prognózu. Jejich hlavní výhoda tkví v krátké době výpočtu simulace. Stupeň podrobnosti schematizace (počet schematizovaných subpovodí a říčních úseků) má vliv na celkovou přesnost výsledků. Pokud bylo povodí řeky Ostravice rozděleno do 30 – 60 subpovodí (dílků povodí), byly dosažené výsledky pro účely této studie dostatečně průkazné a relevantní. Plně distribuované modely jsou oproti semidistribuovaným vhodnější k detailnímu studiu prostorových změn vybraných parametrů povodí, vztažených ke srážkoodtokovému procesu, jenž představuje odpověď povodí na konkrétní srážkové události (15. – 27. 6. 2009; 15. 5. – 5. 6. 2010). Pro další studium prostorové variability parametrů ovlivňujících srážkoodtokový proces jsou pak vhodným nástrojem geostatistické přístupy GIS.

Na základě dosažených výsledků modelování ve zkoumaném území lze konstatovat, že vliv lesního vegetačního krytu na odtok vody z povodí a na fluvialní erozi je podstatný (podrobněji viz kapitola Výsledky). Ovšem za účelem srovnání již dosažených výsledků a jejich zevšeobecnění je žádoucí provést další výzkum podpořený jinými metodami a modelováním, např. v modelech GSSHA a MIKE SHE s průběžným kamerálním i kvantitativním ověřováním výsledků v terénu. Navíc, modelování v dynamických erozních modelech (např. SWAT), hydraulických modelech (MIKE 11) a v modelu HEC-RAS umožňuje provést detailnější analýzu vlivu lesa na kvalitu vody a podmínky transportu sedimentů ve sledovaném území. Takto získané výsledky by mohly být srovnány s výsledky dlouholetého výzkumu hydrologických podmínek a fluvialní eroze v karpatských flyšových povodích.

Poděkování:

Příspěvek vznikl díky podpoře z grantového úkolu VŠB-TUO SP/2010101 „Integrace GIS a numerických modelů pro analýzu zranitelnosti území a operativní krizové řízení ve vztahu k vybraným přírodním a antropogenním rizikům“, za což by autoři rádi poděkovali.

LITERATURA

- BEDIENT P. B., HUBER W. C., VIEUX B. C. 2007. Hydrology and Floodplain Analysis. 4th edition. London, Prentice Hall: 795 s. ISBN 978-0131745896.
- BEVEN, K. J. Rainfall-runoff Modelling. The Primer. London, John Wiley & Sons 2002. 372 s.
- BEVEN K. J. 2009. Environmental Modelling: An Uncertain Future? London, Routledge: 310 s.
- BÍBA M., JAKUBOWSKI W., JAŘABÁČ M., OCEÁNSKÁ Z., VÍCHA Z. 2008. Pravděpodobnosti nejmenších průtoků ve dvou beskydských povodích vyhodnocené hydrologickým modelem Lowfestim. Zprávy lesnického výzkumu, 53 (1): 6-14.
- BÍBA M., JAŘABÁČ M., OCEÁNSKÁ Z., VÍCHA Z. 2005. Minimální odtoky z beskydských experimentálních povodí. Zprávy lesnického výzkumu, 50 (4): 226-234.
- BÍBA M., JAŘABÁČ M., VÍCHA Z. 2006. Poznatky z padesátiletého lesnicko-hydrologického výzkumu v beskydských experimentálních povodích. Zprávy lesnického výzkumu, 51 (1): 44-56.
- BROSCH O. 2005. Povodí Odry. Ostrava, Anagram: 323 s.
- DE LA CRÉTAZ A. L., BARTEN P. K. 2007. Land Use Effects on Streamflow and Water Duality in the Northeastern United States. Boca Raton, CRC Press: 344 s.
- DINGMAN S. L. 2002. Physical Hydrology. Long Grove, Waveland Press: 646 s.
- FÁREK V., UNUČKA J. 2010. Modelování povrchového odtoku v extrémním reliéfu. In: Sborník konference GIS Ostrava 2010. Ostrava, VŠB-TUO: 9 s.
- HAAN C. T., BARFIELD B. J., HAYES J. C. 1994. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. London, Academic Press: 588 s.
- HEWLETT J. D. 1986. Principles of Forest Hydrology. Athens, University of Georgia Press: 183 s.
- HOLUŠA J. et al. 2000. Oblastní plán rozvoje lesů. Přírodní lesní oblast 40 – Moravskoslezské Beskydy. Textová část. Platnost 2001 – 2020. Frýdek-Místek, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů.
- CHANG M. 2006. Forest Hydrology. 2nd edition. London, Taylor & Francis: 474 s.
- CHLEBEK A., JAŘABÁČ M. 1998. Optimalizace koloběhu vody z hlediska stability lesních ekosystémů a ochrany krajiny a vodních zdrojů. Závěrečná zpráva k oponentnímu řízení úkolu č. 9211. Frýdek-Místek, VÚLHM: 7-102.
- CHLEBEK A., JAŘABÁČ M., HOŠEK A. 1997. Dlouhodobé odtoky z malých lesnatých povodí. Zpravodaj Beskydy. Brno, MZLU: 51-56.
- JAŘABÁČ M., BĚLSKÝ J. 2008. The protection against floods becomes effective in the Beskydy Mts. using forest hydrology. Zpravodaj Beskydy č. 2. Brno, MZLU: 37-42.
- KANTOR J. et al. 2003. Lesy a povodně. Praha, MŽP: 48 s.
- MAIDMENT D. R. (ed.) 1993. Handbook of Hydrology. 1st edition. London, McGraw-Hill Professional: 1424 s.
- MAIDMENT D. R. (ed.) 2002. ArcHydro. GIS for Water Resources. ESRI Press: 220 s.
- MAIDMENT D., DJOKIC D. (eds.) 2000. Hydrologic and Hydraulic Modelling Support with Geographic Information Systems. Redlands, ESRI Press: 232 s.
- NETELER M., MITASOVA H. 2010. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. 3rd ed. Dordrecht, Springer: 406 s.
- QUITT E. 1971. Klimatické oblasti Československa. In: Studia Geographica 16. Brno, Geografický ústav ČSAV.
- SINGH V. P., FREVERT D. K. 2005. Watershed Models. Boca Raton, CRC Press: 680 s.
- STARÝ M. 1998. HYDROG-S. Popis programu. Brno, Hysoft.: 112 s. Nepublikováno.
- STARÝ M. 2005. Hydrologie. Skriptum. Brno, VUT: 213 s.
- UNUČKA J. 2008. Modelování vlivu lesa na srážkoodtokové vztahy a vodní erozi s pomocí GIS. Vodní hospodářství: 225-231
- UNUČKA J., JAŘABÁČ M., ŽIDEK D. 2009. Možnosti využití numerických modelů a GIS v lesnické hydrologii. In: Sborník Krajině inženýrství 2009. Praha, Česká společnost krajinných inženýrů – ČSSI: 240-254
- VÁLEK Z. 1977. Lesní dřeviny jako vodohospodářský a protierozní činitel. Praha, Státní zemědělské nakladatelství: 203 s.
- VÍCHA Z., OCEÁNSKÁ Z., BÍBA M., JAŘABÁČ M. 2008. The precipitation-outflow process in the Beskidian experimental watersheds in the year 2007. Zpravodaj Beskydy, č. 1. Brno, MZLU: 215-222.
- WAINWRIGHT J., MULLIGAN M. 2004. Environmental Modelling. Finding Simplicity in Complexity. London, Wiley Blackwell: 430 s.
- WEISMANOVÁ H. et al. Ostravsko. 2004. In: Mackovčín P., Sedláček M. (eds.): Chráněná území ČR. Svazek X. Praha, AOPK & EkoCentrum Brno: 456 s.

COMPARISON OF POSSIBILITY TO USE SEMIDISTRIBUTED AND DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODELS IN FOREST HYDROLOGY ON THE EXAMPLE OF OSTRAVICE CATCHMENT

SUMMARY

Extreme flood events in the Central Europe during the last decades caused that considerable emphasis on accuracy of meteorological and hydrological forecasts is laid. Use of semidistributed and distributed rainfall-runoff models is considered to be a very effective instrument in this field. Detailed information about hydrologic numerical models is published by CHANG (2006) HEWLETT (1986), HAAN et al. (1994), KANTOR et al. (2003) or BEVEN (2002, 2009). In this article the usage of semidistributed and distributed rainfall-runoff models in forest hydrology is discussed on the example of the model basin of the Ostravice River. The effects of forest rainfall-runoff conditions and erosion processes in context of land use planning are studied in a larger scale for this area. Regarding the intention to monitor these processes in the spatial scale of the small forest catchment and to simulate and predict possible scenarios, it is suitable to use analytical tools like geographic information systems (GIS) and numerical hydrologic models – the rainfall-runoff models, hydrodynamic models and dynamic erosion.

The capabilities of these tools are established on the Ostravice River for the real hydrosynoptic situation. We have selected several rainfall-runoff episodes and normal regional rainfall with the low saturation convective watershed and torrential rainfall with higher saturation basin. Results were obtained using different methods of transformation in the hydrological basin scale (Horton, Green-Ampt, SCS-CN) and semidistributed (HYDROG, HEC-HMS), and distributed models (SIMWE, MIKE SHE) confirm the impact of rainfall on forested land-runoff relations. Final testing of models shows good agreement for semidistributed and distributed models. On the basis of hydrologic modelling results in model basin of the Ostravice River we can claim that a forest impact on the rainfall-runoff and erosion conditions is substantial. On the other hand, further research with the support of other methods and the continuous models such as GSSHA or MIKE SHE will allow the comparison of achieved results and their possible generalization. Consequent modelling in dynamical erosion models such as SWAT and hydraulic models MIKE 11 together with HEC-RAS also brings the possibility of the detailed analysis of the forest impact on the water quality and sediment transport conditions of the studied watersheds. These results obtained from hydrologic modelling and dynamical erosion modelling will be compared with the results from the long-standing hydrologic and fluvial erosion research in the Carpathian flysch basins.

Recenzováno

ADRESA AUTORŮ/CORRESPONDING AUTHORS:

doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D., VŠB - Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika
tel.: 597 323 503; e-mail: jan.unucka@vsb.cz

Ing. Milan Jařabáč, CSc., Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.
Strnady 136, 252 02 Jiloviště, Česká republika; e-mail: jarabac@upcmil.cz

RNDr. Martin Adamec, Ph.D., Ostravská univerzita, Přírodovědecká fakulta
Chittussiho 10, 710 00 Ostrava, Česká republika
tel.: 597 092 304; e-mail: martin.adamec@osu.cz

Ing. Dušan Židek, Český hydrometeorologický ústav - pobočka Ostrava
K myslivně 3/2182 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika
tel.: 596 900 206; e-mail: zidek@chmi.cz