PROBLEMATIKA PŘEDPOVÍDÁNÍ A HYDROLOGICKÉHO VYHODNOCENÍ PŘÍVALOVÝCH POVODNÍ

Petr Šercl[1], Jan Daňhelka[1], Radovan Tyl[1]

Abstrakt

V posledních letech se na území ČR vyskytlo několik přívalových povodní, které způsobily značné škody na majetku a vyžádaly si i oběti na lidských životech. Přívalové povodně v červnu a v červenci 2009 se svým rozsahem škod zařadily na třetí místo za regionální povodně v červenci 1997 v povodí Moravy a Odry a v srpnu 2002 v povodí Labe. Jejich meteorologické příčiny, průběh a socioekonomické dopady byly vyhodnoceny v rámci komplexního vládního projektu.

Vyhodnocení povodní v červnu a v červenci 2009 přineslo zejména v oblasti hlásné a předpovědní služby velmi důležité poznatky a závěry. Je kladen větší důraz na zlepšení detekce spadlých extrémních srážek, aplikace metod krátkodobých předpovědí srážek a zprovoznění systému na předpovídání možného rizika vzniku přívalových povodní v reálném čase.

Příspěvek přináší v úvodních kapitolách shrnutí dosavadních poznatků z vyhodnocení meteorologických příčin a průběhu přívalových povodní a ve své druhé části se podrobněji věnuje vývoji systému FFG–CZ.

Systém procedur FFG–CZ, vyvíjených v prostředí ArcView GIS, je založený na aplikaci jednoduchého srážkoodtokového modelu, který využívá srážkové odhady z měření meteorologických radarů v 15minutovém kroku a výsledků z krátkodobé předpovědi pohybu bouřkových cel (tzv. nowcastingu) pro odhad odtokové odezvy na povodích o velikostech od 5 do cca 100 km^2.

Pro odhad velikosti přímého odtoku byla zvolena metoda CN-křivek, kde hodnoty CN jsou operativně upravovány na základě předchozích srážek tak, aby zohlednily vliv předchozího nasycení povodí. Transformace přímého odtoku na odtokovou odezvu povodí je realizována pomocí jednotkového hydrogramu dle Clarka a pro postup vlny po toku je použita metoda Muskingum. Parametry srážkoodtokového modelu byly pro jednotlivá povodí odhadnuty na podkladě fyzicko-geografických charakteristik povodí.

Hlavním výstupem je odhad rizika vzniku přívalové povodně v reálném čase, a to na základě překročení určitých prahových hodnot kulminačního průtoku, které byly stanoveny jako násobek teoretické hodnoty 100letého průtoku.

Klíčová slova: přívalové srážky, přívalové povodně, hydrologická předpověď

1. Úvod

Povodně, vyznačující se prudkým vzestupem a poklesem hladiny vody v řádu několika desítek minut až několika hodin a jejichž příčinou jsou zpravidla intenzivní (přívalové) srážky vypadávající z konvekční oblačnosti, označujeme jako přívalové. Přívalové povodně jsou velice nebezpečným fenoménem, neboť přicházejí náhle, bývají často spojeny s dalšími doprovodnými rizikovými jevy (silná blesková aktivita, krupobití, silný vítr) a prediktabilita jejich potenciálního vzniku je doposud velmi nízká.

I když přívalové povodně nejsou na území ČR v letním období vzácným jevem, v posledních cca 15 letech, ale zejména na konci června a začátkem července 2009, se vyskytlo několik přívalových povodní, které způsobily škody na majetku v souhrnu několika miliard korun a vyžádaly si bohužel i ztráty na lidských životech.

Uvedené zkušenosti podnítily nárůst aktivit jak v odborné sféře, tak i ve sféře státní správy a samosprávy, jejichž obsahem je v oblasti vědy a výzkumu podrobnější analýza vzniku, průběhu a možností předpovídání přívalových povodní, praktická část těchto aktivit je zaměřena na potenciální zlepšení monitoringu, varovných systémů a případných protipovodňových opatření.

Obsahem tohoto příspěvku je shrnutí dosavadních znalostí a zkušeností v oblasti předpovídání, monitoringu a zpětného vyhodnocení příčin a průběhu přívalových povodní a nastínění možností dalšího rozvoje v těchto oblastech.

2. Příčiny a průběh přívalových povodní

2.1 Meteorologické příčiny

Hlavní příčinou vzniku přívalových (dříve „bleskových“) povodní jsou velmi intenzivní srážky vypadávající z konvekční oblačnosti. Extremita přívalových povodní a jejich průběh jsou proto primárně závislé na intenzitě, trvání a plošném rozložení příčinných srážek. Intenzita příčinných srážek zpravidla lokálně vysoce překračuje hodnotu 30 $mm.h^{-1}$ s trváním od desítek minut po několik hodin, přičemž rozloha zasaženého území se pohybuje od několika km^2 až po desítky, výjimečně stovky km^2.

Z meteorologického hlediska se ukazují jako nejnebezpečnější pro vznik přívalových povodní organizované konvekční systémy, kdy nad daným územím dochází k relativně dlouhotrvajícímu obnovování bouřkové činnosti doprovázené přívalovými srážkami.

Typickým a velmi častým případem je tzv. „train effect“, kdy jednotlivé bouřkové buňky postupují po stejné dráze a zasahují totéž území. „Train effect“ byl příčinou dlouhotrvajících velmi intenzivních srážek a následné katastrofální přívalové povodně na Dědině a Bělé v povodí Orlice v noci z 22. na 23. července 1998, kdy za 6 hodin spadlo na ploše cca 130 km^2 v průměru 160 mm srážek (ve stanici Deštné v Orlických horách činil srážkový úhrn 204 mm), viz [2]. Přívalová povodeň 15. července 2002 [5] na Hodonínce (levostranný přítok Svratky) byla způsobena obnovováním málo pohyblivých bouřkových buněk nad postiženým územím, kdy srážkoměrná stanice Olešnice zaznamenala úhrn 172 mm za necelé dvě hodiny (více než 100 mm spadlo cca na 25 km^2 plochy). Obě zmíněné povodně si vyžádaly značné materiální škody a oběti na lidských životech.

Další příčinou pro potenciální vznik přívalových povodní bývá přechod tzv. mezoměřítkového (angl. „mesoscale“) konvekčního systému (MCS), kdy v závislosti na směru postupu linie bouřek v čele MCS může v některých případech rovněž dojít k významné akumulaci spadlých srážek na postižených povodích, viz [3].

Naprosto specifický případ výskytu několika významných přívalových povodní byl zaznamenán na území České republiky v poslední dekádě června a na začátku července 2009, kdy po dobu 12 dní nad naše území proudil teplý, vlhký a instabilní vzduch z oblasti Černého moře a východního Středomoří, kdy téměř každodenně po celé toto období docházelo k výskytu četných bouřek různé intenzity. Obdobná situace s takto dlouhým trváním nebyla prokazatelně za posledních 60 let zaznamenána. Z hydrologického pohledu nejvýznamnějšími událostmi byly přívalové povodně v těchto lokalitách:

– oblast Novojičínska, konkrétně povodí Luhy a Jičínky, 24. 6. 2009 ve večerních hodinách, kde následkem „train effectu“ spadlo na rozloze zhruba 150 km^2 více než 100 mm srážek během dvou až tří hodin,

– oblast Jesenicka v noci z 26. na 27. 6. 2009, povodí vodních toků pramenících v Rychlebských horách a severních svazích Jeseníků, kde intenzivní srážky o úhrnu 50–80 mm za 6–7 hodin spadly do již velmi nasyceného území, což negativně přispělo k velikosti následné odtokové odezvy,

povodí Blanice a Volyňky v noci ze 27. na 28. 6. 2009, kde intenzivní srážky o úhrnu 50–80 mm za 7–8 hodin spadly do již velmi nasyceného území, v podstatě obdobná situace jako na Jesenicku,

– Děčínsko, povodí Kamenice a Bystré (přítok Ploučnice) 1. 7. a 4. 7. 2009, kde došlo k opakovanému výskytu přívalových srážek na stejném území, intenzita srážek místně překročila 50–70 mm za dvě hodiny.

Podle výše způsobených škod byly důsledky přívalových povodní v červnu a v červenci 2009 po regionálních letních povodních v letech 1997 a 2002 třetí nejvýznamnější za posledních 15 let a vyžádaly si rovněž oběti na lidských životech. Komplexní vyhodnocení těchto povodní bylo předmětem vládního projektu, jehož výsledkem je mimo jiné publikace určená pro širokou veřejnost [1].

2.2 Doprovodné faktory mající vliv na průběh přívalových povodní

Vedle příčinných srážek jako hlavního faktoru a již zmíněného předchozího nasycení území mají na průběh přívalových povodní významný vliv fyzicko-geografické charakteristiky postiženého území (povodí). V první řadě je nutné uvést způsob využívání území a s tím související propustnost půdního povrchu, kde se zmenšující se propustností roste podíl odteklé vody ze srážek a voda rovněž odtéká i rychleji. Dalším důležitým faktorem jsou sklonitostní poměry. Větší sklon svahů společně se zmenšenou propustností vytváří velmi nepříznivou kombinaci při procesu formování odtoku (např. poměrně dramatická odtoková odezva na Jesenicku 26. 7. 2009), kde může navíc dojít i k výrazným projevům eroze, odnosu splavenin a zemědělské půdy, příp. i k následným sesuvům.

Významnou roli může hrát i tvar povodí, kdy za určitých okolností dochází u vějířovitých povodí ke střetu vrcholových částí povodňových vln.

Antropogenní vliv na průběh přívalových povodní již byl nepřímo zmíněn ve způsobu využívání území, kdy člověk může pozitivně i negativně ovlivnit odtokové poměry v povodí. Do průběhu povodně významně zasahují i komunikační a vodohospodářské stavby přímo na toku. Zatrubnění toků, málo kapacitní mosty nebo propustky, příp. malé vodní nádrže mohou velmi negativně ovlivnit průběh povodně. U propustků nebo mostů může dojít k jejich ucpání splaveným materiálem, následnému protržení a vzniku průlomové vlny. U malých vodních nádrží za situace přítoku vody ze silných přívalových srážek velmi rychle dojde k vyčerpání jejich retenčního objemu a následnému přelévání hrází, kdy hrozí jejich protržení a rovněž vznik průlomové vlny (např. Hustopeče nad Bečvou, 24. 6. 2009). Naopak větší retenční nádrže dokáží povodňovou vlnu z přívalových srážek zpravidla velmi účinně transformovat (např. 2. 7. 2009 na Oslavě, nádrž Mostiště).

Důsledky zatrubnění toků bývají nepředvídatelné, ale zpravidla po zahlcení či ucpání vtoku dojde k průchodu povodňové vlny intravilánem po povrchu s často ničivými následky (např. obce Crhov a Olešnice na Blanensku 15. července 2002).

Velká část výše uvedených vlivů se může za reálné situace zkombinovat, takže skutečný průběh povodně je jen těžko předvídatelný.

3. Monitoring a vyhodnocení přívalových povodní

Na rozdíl od plošně rozsáhlých regionálních povodní není výskyt přívalových povodní bezprostředně vázán na záplavová území větších vodotečí, ale po vypadnutí intenzivních srážek se povrchový odtok nejprve soustřeďuje do údolnic lokálních malých vodotečí nebo po většinu roku suchých koryt, erozních rýh atd., a až poté se dostává do významnějších toků, které bývají již hydrologicky sledovány. Dočasnými „řečišti“ se stává i síť zpevněných cest. Na územích s nízkou nebo s dočasně sníženou infiltrační schopností (např. i vlivem nasycení předchozími srážkami) dochází i k plošnému povrchovému odtoku, takže postižena

náhlým zatopením mohou být i ta území (části obcí), která neleží v bezprostřední blízkosti vodního toku.

Vzhledem k plošné velikosti území, které je zasažené přívalovými srážkami, je monitoring případných přívalových povodní poměrně obtížný, protože hustota sítí srážkoměrných a vodoměrných stanic není a pravděpodobně ani nebude v tomto směru nikdy dostatečná. Přitom většina hydrologických posudků se provádí na malých nepozorovaných povodích, takže vyhodnocení příčinných srážek a hydrologické odezvy je pro hydrologickou praxi velmi významné a důležité.

Vyhodnocení přívalových povodní z června a července 2009 [1], kdy kulminační průtoky v mnoha profilech významně přesáhly stávající hodnoty 100letých průtoků, přineslo tyto základní poznatky:

Nejvěrohodnější pole příčinných srážek lze získat kombinací měření meteorologického radaru a opravných koeficientů, získaných z měření srážkoměr-ných stanic (zpravidla 24hodinových úhrnů). Pro zjednodušení (s vědomím nepřesnosti) lze stejný opravný koeficient použít jak pro celkovou sumu srážek, tak i pro kratší intervaly.

Pro odhad velikosti kulminačních průtoků lze využít jak hydraulického modelu, v nepozorovaných profilech rovněž i srážkoodtokového modelu. Výhodou srážkoodtokového modelu je odhad celého průběhu povodňové vlny (a tím i proteklého objemu) v libovolném stanoveném profilu na základě časového průběhu spadlých srážek, oproti tomu hydraulický model se může opřít o detailní geodetická zaměření příčných profilů a stop maximální hladiny. U hydraulického modelu je však velmi problematické určení součinitele drsnosti, takže nejistota odhadu kulminačního průtoku může dosáhnout až 20 %, u srážkoodtokového modelu může být nejistota ještě vyšší.

Celkové objemy povodňových vln dosahovaly i při velké extremitě kulminačního průtoku (> 100 let) zhruba 30–50 % z objemu spadlých příčinných srážek, což svědčí o poměrně dobré schopnosti svrchní půdní vrstvy zadržet vodu v počáteční fázi nástupu přívalových srážek. U zasažených povodí nebylo prokázáno významné negativní ovlivnění průběhu povodně antropogenní činností.

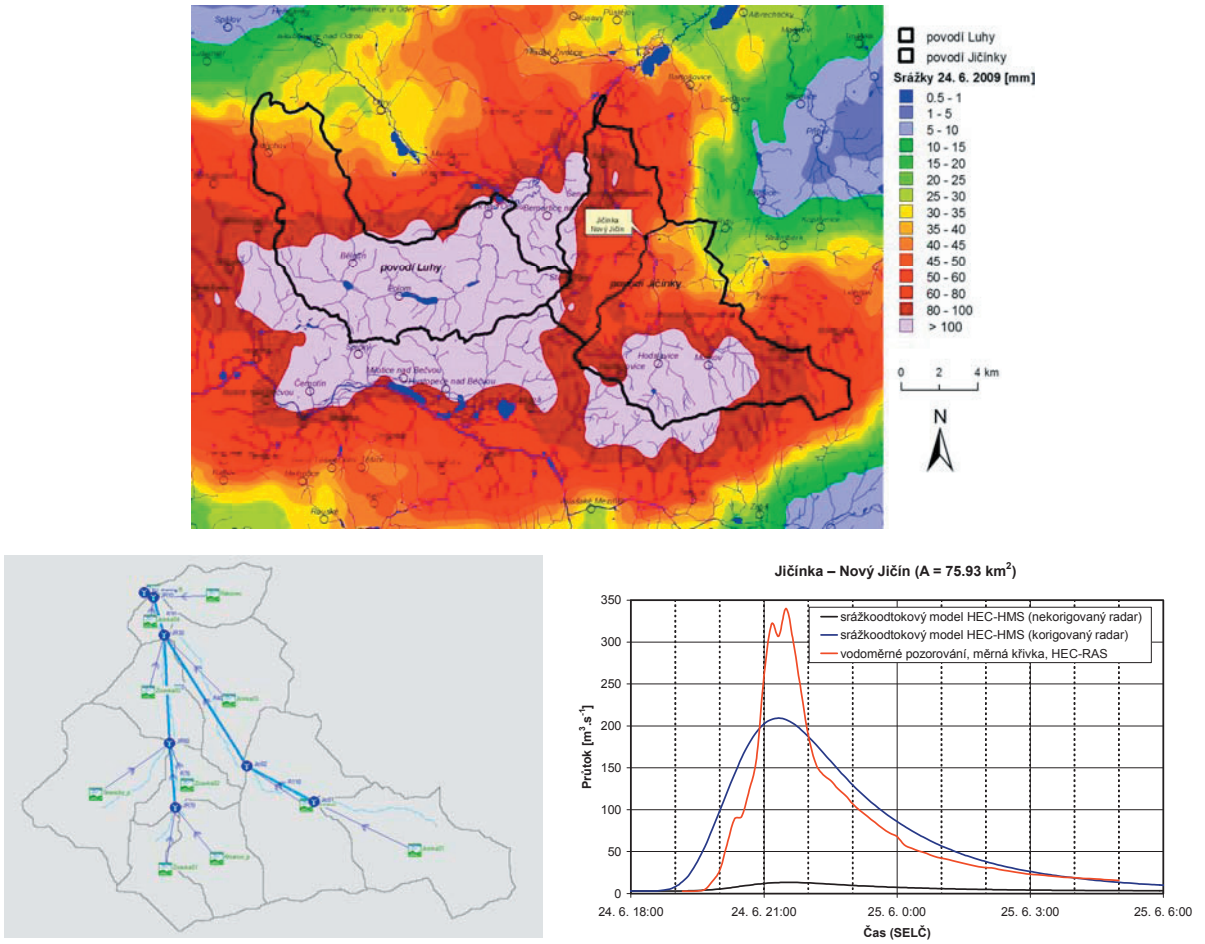
Příklad vyhodnocení pole srážek a odtokové odezvy je na Obr. 1 pro profil vodoměrné stanice Nový Jičín na Jičínce ze 24. 6. 2009.

Pro odhad pole 24hodinových úhrnů srážek byla využita metoda kombinace měření meteorologického radaru a opravných koeficientů, získaných z měření srážkoměrných stanic. Totéž pole opravných koeficientů bylo použito i pro odhad 15minutových srážkových úhrnů, které sloužily jako vstup do srážkoodtokového modelu HEC-HMS. Schéma rozdělení na dílčí povodí je na Obr. 1.

Jako transformační funkce povodí byl aplikován Clarkův jednotkový hydrogram a pro odhad velikosti odtoku byla použita metoda CN křivek, kde v hodnotách CN bylo zohledněno nasycení území předchozími srážkami. Parametry jednotkového hydrogramu (doba koncentrace, transformační faktor) byly odvozeny z fyzicko-geografických charakteristik jednotlivých dílčích povodí. Pro postup vlny v toku byla použita metoda Muskingum.

Odvozený hydrogram pomocí modelu HEC-HMS je v grafu na Obr. 1 znázorněn modře. Pro srovnání je v grafu znázorněn i hydrogram odvozený z nekorigovaných srážkových vstupů z radaru (černou barvou). Je naprosto zřejmé, že u této události došlo k velmi významnému (konkrétně až pětinásobnému) podcenění odhadu celkového množství spadlých srážek.

Velikost kulminačního průtoku byla odhadnuta pomocí hydraulického modelu HEC-RAS na základě zaměřených stop hladiny, viz příloha zprávy [7]. Hydraulické výpočty byly použity i pro extrapolaci měrné křivky průtoku v profilu stanice Nový Jičín. Hydrogram, který vychází z vodoměrného pozorování, je v grafu na Obr. 1 znázorněn červeně.



Obr. 1: Rozložení srážek 24. 6. 2009, schéma rozdělení povodí pro srážkoodtokový model (vlevo) a hydrogramy povodně v profilu Nový Jičín na Jičínce (vpravo).

Na první pohled z porovnání výsledků vyplývá, že srážkoodtokový model v tomto případě nedokázal plně podchytit dynamiku vývoje povodně a pravděpodobně značně podhodnotil velikost kulminačního průtoku. Zároveň ale lze konstatovat, že za předpokladu přiměřeně kvalitních operativních srážkových vstupů (adjustovaný radar) bude možné srážkoodtokový model na bázi HEC-HMS využít pro detekci míry rizika přívalových povodní na malých a středních povodích.

4. Možnosti predikce přívalových povodní, systém FFG–CZ

Velká dynamika vývoje konvekčních bouří je hlavní příčinou, proč stávající meteorologické modely zpravidla nemohou úspěšně předpovědět jak lokalitu, tak i čas výskytu vypadnutí přívalových srážek, které mohou způsobit přívalovou povodeň.

Pravděpodobně jedinou z možností predikce rizika výskytu přívalové povodně jsou operativní vstupy adjustovaných odhadů srážek z měření meteorologického radaru v co nejkratším časovém kroku, využití nowcastingu (krátkodobá předpověď postupu bouřkových jader vycházející z analýzy předchozích radarových snímků) a aplikace jednoduchého srážkoodtokového modelu pro odhad odtokové odezvy.

Důležitou součástí systému predikce je stanovení aktuální nasycenosti území. V rámci výzkumného projektu VaV 1D/1/5/05 „Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR“ řešeného v letech 2005–2007 pod garancí MŽP ČR byla v ČHMÚ jako hlavním řešitelském pracovišti připravena procedura založená na denní bilanci srážek, odtoku a aktuální evapotranspirace,

jejímž výstupem jsou aktualizované hodnoty CN. Algoritmus bilančního výpočtu je podrobně popsán v závěrečné zprávě zmíněného projektu [4].

Na výsledky zmíněného projektu bylo navázáno v dalším výzkumném projektu – SP/1c4/16/07 „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR“ (řešeného v letech 2007–2011 rovněž pod garancí MŽP ČR), kde náplní dílčího úkolu „Vývoj robustní metody odhadu odtoku z přívalových srážek“ řešeného v ČHMÚ je vývoj procedur určujících odhad rizika potenciálního výskytu přívalových povodní. Systém procedur je zkráceně nazýván **FFG–CZ** („**F**lash **F**lood **G**uidance–**CZ**ech“), pro jehož název a částečně i obsah nalezli řešitelé inspiraci v systému FFG, provozovaného Národní meteorologickou službou USA (NWS), viz http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php.

Systém FFG–CZ, založený na platformě ArcView GIS 3.x a určený pro odhad odtokové odezvy z přívalových srážek na povodí do velikosti cca 100 km^2, sestává z následujících dílčích částí:

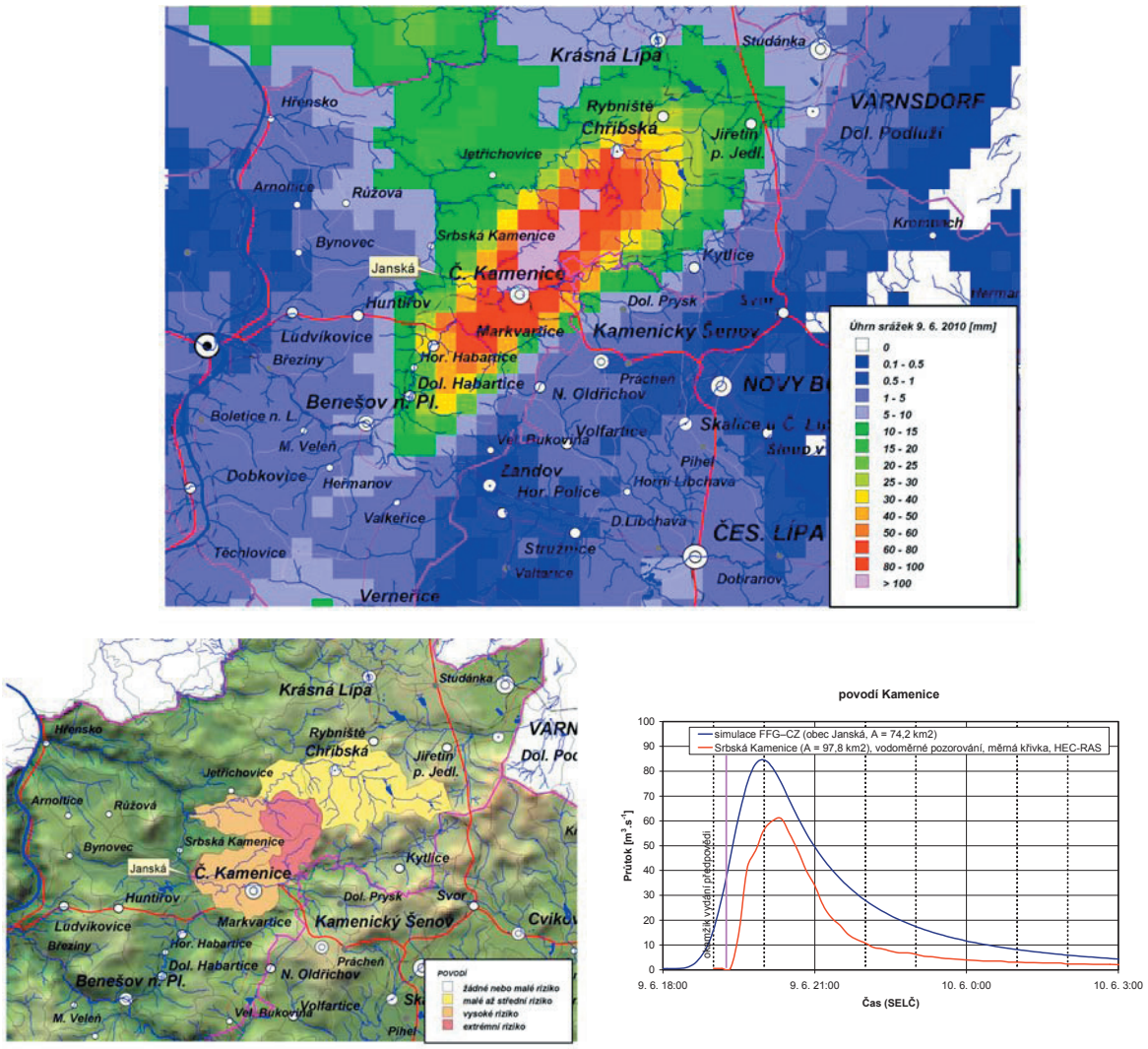
- Výpočet aktuální nasycenosti povodí (denní aktualizace hodnot CN); vstupní data:
  - Rastry denních úhrnů srážek (kombinace srážkoměr+radar).
  - Aktuální denní evapotranspirace ve stanicích interpolovaná do rastru.

- Implementace srážkoodtokového modelu (na bázi HEC-HMS: metoda CN křivek, Clarkův jednotkový hydrogram, Muskingum) pro odhad odtokové odezvy; vstupní data:
  - Rastry 15minutových srážek (adjustovaný radar; možnost uplatnění dat z nowcastingu).
  - Polygonová vrstva základních povodí (velikost cca 5–20 km^2) s fyzicko-geografickými charakteristikami.

Hlavním výstupem FFG–CZ je výpočet odtokové odezvy na (zvolených) povodích, a to na základě operativních 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek. Z odhadu kulminačního průtoku a dosažení či překročení zvolených tří prahových hodnot (násobku regresního odhadu Q_{100} dle metody popsané v [6]) je stanovena míra rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně.

Na Obr. 2 je uveden příklad výstupů ze systému FFG–CZ pro případ přívalové povodně, která se vyskytla v povodí Kamenice 9. června 2010 ve večerních hodinách.

Na mapce v horní části Obr. 2 je znázorněno rozložení srážek, přičemž většina srážek spadla mezi 18. a 19. hodinou. Výpočet hydrogramů byl proveden z 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek za období 17:15–19:00, v reálném čase by tato předpověď byla k dispozici cca v 19:15. První indikace povodňového rizika (stupeň 1–žlutý) v postižené oblasti (Lísecký a Studený potok) byl zaznamenán z běhu výpočtu již v 18:45, což byla povodí postižená nejintenzivnějšími srážkami, v 19:00 by již byl pro tato povodí signalizován stupeň 3. Z tohoto faktu je zřejmé, jak vysoká intenzita přívalových srážek se vyskytovala ve srážkovém centru.



Obr. 2: Rozložení srážek dne 9. 6. 2010, stupně potenciálního rizika přívalové povodně (vlevo) a hydrogramy povodně v povodí Kamenice (vpravo).

V grafu na obrázku vpravo dole je fialovou čárou vyznačen okamžik výpočtu předpovědi a červená čára je hydrogram povodně zaznamenaný ve vodoměrné stanici Srbská Kamenice. Z grafu je zřejmý velice rychlý nástup povodně, kdy v profilu Srbská Kamenice započal v době předpovědi nástup povodně, zatímco dle modelových výpočtů povodeň na povodích Lískeckého a Studeného potoka již v té době kulminovala.

Z toho plyne, že eventuální varovný systém musí být velice pružný a rychlý, aby bylo možné případné varování

- okamžitě aktualizovat na webových stránkách ČHMÚ, případně
- přímo směřovat do (potenciálně) postižených a ohrožených obcí.

5. Závěr

Značné materiální škody a oběti na životech, které si v posledních letech vyžádaly přívalové povodně na území ČR, obrátily k tomuto fenoménu značnou pozornost, a to jak odborné, tak i laické veřejnosti.

Komplexní vyhodnocení přívalových povodní z června a července 2009 a vývoj systému FFG–CZ pro operativní vyhodnocování rizika vzniku přívalových povodní jsou prvními důležitými kroky, které by měly podnítit:

- rozvoj monitoringu potenciálně nebezpečných meteorologických jevů (konvekčních bouří), a to zejména investicemi do údržby a inovací technologie měření meteorologických radarů,
- další rozvoj celostátních, regionálních a lokálních varovných systémů,
- systematický výzkum meteorologických příčin, průběhu a socioekonomických dopadů přívalových povodní,
- vybudování databáze s evidencí historických případů přívalových povodní.

Literatura

[1] DAŇHELKA, J. – KUBÁT, J., 2010. Přívalové povodně na území České republiky v červnu a červenci 2009. Praha: ČHMÚ, MŽP. 72 s., ISBN 978-80-86690-75-9

[2] HANČAROVÁ, E. – METELKA, L. – MRKVICA, Z. et al, 1999. Katastrofální povodeň v podhůří Orlických hor ve dnech 22. až 25. 7. 1998. Meteorologické zprávy, roč. 52, č. 1. s. 1–12.

[3] ŘEZÁČOVÁ, D. – NOVÁK, P. – KAŠPAR, M. – SETVÁK, M., 2007. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia. 574 s. + DVD. ISBN 978-200-1505-1

[4] ŘIČICOVÁ, P. a kol., 2007: Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR. [Souhrnná závěrečná zpráva ČHMÚ a VÚMOP projektu VaV 1D/1/5/05]. Praha. ČHMÚ.

[5] SOUKALOVÁ, E. et al, 2002. Příčinný déšť a povodně na Blanensku a Žďársku v červenci 2002. Meteorologické zprávy, roč. 55, č. 5. s. 141–144.

[6] ŠERCL, P., 2009. Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln. Sborník prací ČHMÚ, svazek 54, Praha: ČHMÚ. 88 s., ISBN 978-80-86690-62-9, ISSN 0232-0401

[7] ŠERCL, P. et al, 2010. Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky. Hydrologický průběh povodní. Dílčí zpráva. Praha: ČHMÚ, MŽP. DVD se souhrnnou zprávou a dílčími zprávami z projektu, k dispozici rovněž na internetových stránkách ČHMÚ.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav Praha,
e-mail: sercl@chmi.cz, danhelka@chmi.cz, tyl@chmi.cz