

Zmeny meteorologických podmienok rizika povodní v meniacej sa klíme

M. Lapin: Changes in Meteorological Conditions of Flood Risk in the Changing Climate. Život. Prostr., Vol. 37, No. 4, 184 – 190, 2003.

The newest general circulation models (GCMs) with coupled systems of atmospheric and ocean circulation (coupled GCMs) offer output of monthly data for 46 climatic elements at the Canadian GCM CCC M1/M2 (1997/2000) and for 59 elements at the U.S. GCM GISS (1998). From this offer we have calculated the regional scenarios of selected 11 elements change for the Slovakia centre and for Hurbanovo. Such scenarios can be used directly for hydrological applications. Our aim was to prepare scenarios also as time series for several elements by the method not affecting seriously the original physical plausibility among elements existing in the GCMs output. Calculation of extreme daily and several-day precipitation based on GCMs output, physical equations and synoptic analysis of data in the reference period was the next step of climatic scenarios design. These scenarios indicate increase in extreme precipitation causing flash floods by 20 – 50 % and also increase in “dry” periods with low precipitation. The Kysuca and Hron river basins were the control areas for hydrological testing of extreme precipitation scenarios.

Vplyv klimatickej zmeny na hydrologické procesy je tesne spojený s možnými zmenami rozhodujúcich klimatických prvkov (teploty vzduchu, úhrnov a premenlivosti zrážok, vlhkosti vzduchu, výskytu snehovej pokrývky, slnečnej radiácie a oblačnosti, výparu, vlhkosti pôdy, prúdenia). Dôležitú úlohu tu však hrá aj odozva zmien klimatických prvkov v komplexe hydrologických procesov, čo značne závisí od geografických, orografických, hydrografických a hydrogeologických podmienok konkrétneho povodia. Ideálnou možnosťou by bola príprava klimatických scenárov v takom tvare, aký majú aj originálne údaje v referenčnom/kontrolnom období v minulosti (najlepšie v období 1951 – 2000, prípadne iba 1951 – 1980). Konštrukcia a výpočet regionálne interpretovaných klimatických scenárov má určité obmedzenia vyplývajúce z fyzikálnych a matematických možností modelovania klimatických procesov. Preto sa scenáre pripravujú väčšinou iba v tvare územných priemerov v časových horizontoch (u nás pre celé Slovensko a pre horizonty r. 2010, 2030 a 2075). Okrem toho boli v minulosti spracované aj *prúrazkové, analógové a kombinované scenáre* pre rovnaké časové horizonty (použili ich

napr. Pekárová a kol., 1996; Hlavčová a kol., 2000). Najnovšie verzie klimatických modelov už umožňujú odklon od naznačenej schémy a otvorili sa cesty na prípravu scenárov *klimatických časových radov a extrémov*. V príspevku stručne prezentujeme predovšetkým novšie výsledky získané r. 2001 a 2002 dotýkajúce sa prípadov veľmi vysokých úhrnov zrážok, ktoré zapríčinili náhle povodne. Tieto výsledky boli aj experimentálne overené na vybraných povodiach v SR a v povodiach Hrona a Kysuce (Szolgay a kol., 2002; Petrovič, 2002).

Pri riešení úloh Národného klimatického programu SR (NKPSR) a iných úloh na Slovensku využívame údaje z modelov Kanadského strediska pre klimatické modelovanie a analýzu vo Victorii (Britská Kolumbia, Kanada), v ostatných rokoch hlavne najnovší prepojený model 2. generácie (CCCM 2000, ďalej CCCM20), predtým aj CCCM 1997 (ďalej CCCM97). Použili sme aj najnovší prepojený GCM GISS 1998 (ďalej GISS98) z Goddardovho ústavu pre vesmírne štúdie pri NASA v USA (Goddard Institute for Space Studies, New York), ktorého výstupy sme v r. 2001 a 2002 spracovali do väčších podrobností (Melo, 2003).

Tab. 1. Priemer a variačný koeficient prvkov v Hurbanove v období 1951 – 2000 z výstupov CCCM20 a GISS98

Priemery a Cv Pri T je SD	T [°C]	Var T [°C]	R [mm]	Var R [%]	G [W.m ⁻²]	s [g.kg ⁻¹]	FF [m.s ⁻¹]	N [%]	E [mm]	W [%]
Priemer HU	10,4	8,6	538,3	178,6	152,7	6,1	3,0	55	431,6	65,5*
Cv HU [%]	0,75	7,6	9,3	12,3	3,0	4,4	10,1	74	12,5	23,0*
Priem. CCCM	7,0	7,9*	1112,2	x	148,1	7,2	3,0	x	660,8	88,0
Cv CCCM [%]	1,00	5,5*	10,2	x	3,0	4,2	5,7	x	4,7	5,5
Priemer GISS	9,5	6,8	934,3	126,9	154,4	6,8	4,1	59	734,4	71,6*
Cv GISS [%]	0,52	6,3	7,4	4,0	1,9	3,1	3,8	41	2,3	3,3*

pri T a Var T je SD v °C namiesto Cv

(* približný nepriamy výpočet, T – teplota, R – zrážky, G – globálne žiarenie, s – merná vlhkosť vzduchu, FF – rýchlosť vetra, N – oblačnosť, E – výpar, W – vlhkosť pôdy, Var T – premenlivosť denných priemerov teploty, Var R – premenlivosť denných úhrnov zrážok, SD – smerodajná odchýlka, Cv – variačný koeficient)

Prednosti a obmedzenia klimatických scenárov

Fyzikálna konzistentnosť je kľúčovým problémom scenárov viacerých klimatických prvkov z jedného miesta pripravovaných modernými metódami, najmä ak ide o scenáre časových radov denných alebo mesačných údajov. Všetky ostatné scenáre považujeme iba za prírastkové, teda za akúsi kombináciu vhodných prírastkov (úbytkov) priemerov jednotlivých premenných v porovnaní s priemermi premenných v kontrolnom/referenčnom rade (väčšinou s 1951 – 1980, tzv. baseline scenario). Pri novej generácii výstupov modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs) fyzikálna konzistentnosť vyplýva z použitých fyzikálnych rovníc v modeloch a z matematických metód výpočtov. V priebehu regionálnej modifikácie výstupov GCMs môže (ale nemusí) dôjsť k porušeniu uvedených vzťahov. Výstupy globálnych GCMs nereprezentujú reálne sa vyskytujúcu lokálnu klímu. S určitou možnosťou predpokladá, že reprezentujú územné priemery premenných v uzlových bodoch, teda na ploche asi 60 – 100 tisíc km², čiže až na dvojnásobku plochy Slovenska. Navyše, ide o priestor so značne zhladenou orografiou, bez reálne sa vyskytujúcich náveterných a záveterných efektov (Alpy majú najviac 1 000 m n. m. a tvoria s Karpatmi jedno ploché pohorie v strednej Európe, pričom Panónska kotlina väčšinou chýba, Melo, 2003). Ak máme pri modifikácii výstupov GCMs získať scenáre ako časové rady alebo extrémne reprezentujúce jednotlivé stanice, musíme predovšetkým nájsť vzťah medzi časovými radmi územných priemerov a časovými radmi na jednotlivých staniaciach. Ako sa dalo očakávať, tento problém je najzaujímavejší v prípade úhrnov zrážok (veľká premenlivosť ročného chodu a priestorovej distribúcie) a nemá praktický zmysel sa ním zaoberať v prípade mesačných priemerov teploty vzduchu. Horšia je situácia pri posudzovaní priestorovej variability iných prvkov, kde ne-

máme dostatok podkladov na výpočet územných priemerov pre jednotlivé mesiace (Lapin a kol., 2001b). Ak posudzujeme na základe výstupov GCMs podmienky vzniku mimoriadnych zrážkových situácií, úloha je o to ťažšia, že takéto údaje priamo vo výstupoch GCMs nenájdeme, môžeme ale o týchto podmienkach pomerne korektne fyzikálne usudzovať podľa meniacich sa iných premenných (teploty a vlhkosti vzduchu, atmosférickej cirkulácie a pod.).

Scenáre – porovnanie s referenčnou klímou

Modely CCCM97, CCCM20 a GISS98 poskytujú vo výstupoch časové rady údajov viacerých klimatických a hydrologických prvkov (46 pre CCCM a 59 pre GISS). Z nich sme na regionálnu interpretáciu a na detailnejšiu analýzu na Slovensku doteraz využili iba 11. Z modelov CCCM využívame výstupy zo štyroch uzlových bodov s priemernou nadmorskou výškou 561 m a z modelu GISS98 s priemernou nadmorskou výškou 364 m. Vzďalenosť uzlových bodov je asi 300 km. Pri akejkolvek regionálnej modifikácii sa časová variabilita jednotlivých prvkov znižuje v závislosti od počtu uzlových bodov (čím sa berie do úvahy viac uzlových bodov, tým je variabilita interpolovaného časového radu menšia). Z modelu CCCM20 (1900 – 2100, mesačné charakteristiky po rokoch) a z modelu GISS98 (1990 – 2099, mesačné charakteristiky po desaťročiach a ročné po jednotlivých rokoch) sme analyzovali prvky uvedené v tab. 1 a ešte tlak vzduchu (Lapin a kol., 2001b; Melo, 2003).

Metodika regionálnej interpretácie výstupov GCMs do konkrétnych staníc má dve úrovne. Ak potrebujeme zistiť iba zmenu dlhodobých priemerov, napríklad v období 2051 – 2100 v porovnaní s 1951 – 1980, nepotrebujeme údaje pozorovanej klímy v referenčnom období 1951 – 1980. Ak chceme skonštruovať scenáre ako časové rady ročných, mesačných, prípadne aj denných údajov,



Povodeň na Dunaji v Bratislave (august 2002). Foto: Archív SHMÚ v Bratislave.

Povodeň v lužnom lese na dolnom Hrone (august 2002). Foto: M. J. Lisický.



porovnávanie pozorovanej a modelovanej klímy v referenčnom období musíme urobiť detailne. Porovnáваме aj priemery i premenlivosť mesačných alebo denných hodnôt za dlhšie (20 až 30 r.) obdobia. Podrobnejšie sa budeme venovať iba vlhkosti a prúdeniu vzduchu.

Merná vlhkosť vzduchu (s) dominantne určuje niektoré meteorologické procesy, preto je veľmi dôležité, aby sme aj jej scenáre správne interpretovali a používali v modelových výpočtoch dôsledkov klimatickej zmeny. Dalo sa očakávať, že sa vyskytnú určité rozdiely v porovnaní s meranými údajmi, najmä keď pri CCCM97 boli absolútne hodnoty mernej vlhkosti vzduchu také vysoké, že boli takmer nepoužiteľné. Aj CCCM20 udáva vyššiu mernú vlhkosť vzduchu, čo súvisí jednak s relatívne vyššou teplotou vzduchu v lete a celkovo vlhším charakterom tohto modelu v strednej Európe. Obidva modely "nepoznajú" Pannónsku kotlinu a ani záveterné efekty Álp a Karpát, ktoré vytvárajú suchšiu klímu ako by zodpovedalo takej orografii, akú predpokladajú modely CCCM20 a GISS98. Napriek tomu môžeme konštatovať, že model GISS98 je o málo bližšie pozorovanej skutočnosti aj pokiaľ ide o absolútne hodnoty i ročný chod mernej vlhkosti vzduchu (nadmorská výška interpolovaného bodu v strede SR je pri CCCM20 až 561 m a pri GISS98 364 m, Hurbanovo má 115 m). Aj keď ide pri CCCM20 o územné priemery mernej vlhkosti vzduchu na plochom návrší v strednej Európe, sú prekvapivo pomerne malé rozdiely aj vo variačnom koeficiente C_v mesačných a ročných priemerov v porovnaní s Hurbanovom. Nespracovali sme relatívnu vlhkosť vzduchu, ktorá by poskytla lepší obraz o skutočných vlhkosťových pomeroch. Očakávame, že model CCCM20 predpokladá na Slovensku relatív-

Tab. 2. Inkrementálne scenáre polhodinových, 3-hodinových a 24-hodinových úhrnov zrážok podľa zjednodušenej rovnice zrážok

Merná vlhkosť vzduchu [s] na hladine 900 hPa v stave nasýtenia [g.kg ⁻¹]	30-minútové zrážky			180-minútové zrážky			24-hodinové zrážky		
	Priemerná w [m.s ⁻¹]			Priemerná w [m.s ⁻¹]			Priemerná w [m.s ⁻¹]		
	1,0	2,0	4,0	0,5	1,0	2,0	0,1	0,2	0,4
0,5	0,9	1,8	3,7	2,8	5,5	11,1	4,4	8,9	17,7
1,0	1,8	3,7	7,4	5,5	11,1	22,2	8,9	17,7	35,4
1,5	2,8	5,5	11,1	8,3	16,6	33,2	13,3	26,6	53,2
2,0	3,7	7,4	14,8	11,1	22,2	44,4	17,7	35,5	71,0
4,0	7,4	14,8	29,6	22,2	44,4	88,8	35,5	71,1	142,1
10,0	18,5	37,0	74,1	55,6	111,1	222,3	88,9	177,8	355,7
16,0	29,5	58,9	117,9	88,4	176,8	353,6	141,4	282,9	565,7
20,0	36,4	72,7	145,5	109,1	218,2	436,4	174,5	349,1	698,2

w – vertikálna rýchlosť prúdenia; hladina kondenzácie 900 hPa; horná hladina výstupu 200 hPa

nu vlhkosť vzduchu porovnateľnú s podmienkami v horských polohách, prípadne ešte o málo vyššiu (má výšku 561 m n. m.), model GISS98 má nižšiu nadmorskú výšku (364 m) a lepšie vyjadruje podmienky relatívnej vlhkosti vzduchu v nižších polohách Slovenska (Lapin a kol., 2001a; 2001b; Melo, 2003).

Atmosférické prúdenie súvisí jednak s tlakovým poľom v strednej Európe, jednak s miestnymi orografickými podmienkami. Z porovnania údajov z hladiny 850 hPa možno usúdiť, že v zásade nie sú žiadne závažné rozpory medzi modelovými výstupmi CCCM20, GISS98 a meranými údajmi. Dobré je vyjadrený ročný chod, GISS98 predpokladá vyššiu priemernú rýchlosť vetra a má charakteristickejšiu ročný chod. Aj porovnaním smerodajnej odchýlky mesačných a ročných priemerov rýchlosti vetra pre CCCM20 a stanice Poprad a Hurbanovo sa potvrdila dobrá zhoda modelových výstupov CCCM20 a meraných údajov na Slovensku. V poli tlaku vzduchu sa vo všetkých hladinách prejavuje dobrá schopnosť obidvoch modelov charakterizovať existujúcu všeobecnú cirkuláciu atmosféry (Damborská et al., 2002).

Od predchádzajúcich úvah a výpočtov je len malý krok k návrhu scenárov časových radov klimatických prvkov. V zásade môžeme použiť 3 základné metódy: 1. najjednoduchšou je metóda modifikácie časového radu z referenčného obdobia (1951 – 1980), ktorý zmeníme v súlade so scenármi dlhodobých priemerov pre časové horizonty 2010, 2030 a 2075; 2. pomocou stochastického generátora môžeme vyrobiť umelé časové rady za vopred zvolených predpokladov. Ak potrebujeme scenáre pre viac prvkov, len veľmi ťažko sa dá dosiahnuť ich prijateľná vzájomná fyzikálna konzistentnosť (korektnosť), 3. z výstupov GCMs môžeme použiť časové rady mesačných a denných údajov, ktoré sa nikdy nedajú aplikovať priamo a musíme ich regionálne modifikovať

podľa časových radov experimentálnych údajov v referenčnom období (výstupy GCMs sú určite fyzikálne konzistentné, vyplýva to z fyzikálnej podstaty modelov). Viac o problematike Lapin a kol., 2001b, 2002.

Scenáre extrémov krátkodobých zrážok

Pre viaceré hydrologické aplikácie sú nevyhnutné vstupy časových radov alebo individuálnych úhrnov extrémnych zrážkových situácií, lebo práve počas alebo po týchto udalostiach môže vzniknúť povodňová situácia s veľkými materiálnymi škodami. Problém scenárov možného vývoja extrémnych zrážok v podmienkach klimatickej zmeny sa dá riešiť prinajmenšom dvomi spôsobmi:

- predpokladajme, že sa extrémny krátkodobých zrážok nezmenia oproti zisteným historickým maximám – potom môžeme na pozadí zmeneného režimu priemerných mesačných úhrnov konštruovaných v súlade so scenármi riešiť problém tak, že tam infiltrujeme historický extrém,
 - oveľa pravdepodobnejším sa zdá prípad so zmenenými extrémami, pretože to priamo vyplýva z fyzikálneho mechanizmu vzniku extrémnych zrážok – v teplejšej atmosfére je viac vody v skupenstve vodnej pary (pri rovnakej relatívnej vlhkosti vzduchu) a je veľmi pravdepodobné, že sa vyskytne taký prípad, keď stav nasýtenia nastane extrémne pri takej teplote vzduchu, ktorá je práve o toľko vyššia oproti historickému maximu, aké oteplenie udávajú scenáre mesačných priemerov teploty vzduchu.
- Jednoduchý vzťah na výpočet úhrnu zrážok R za časový interval t_0 až t pri usporiadaných výstupných pohyboch má tvar (Lapin a kol., 2002):

Tab. 3. Scenáre (kvocienty) zmien mesačných úhrnov zrážok a mernej vlhkosti vzduchu v 50-ročnom horizonte pre stred Slovenska v porovnaní s normálom 1951 – 1980

	H = 2075	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R	CCCM97	1,22	1,12	1,17	1,04	1,07	0,87	0,89	0,94	1,03	1,09	1,18	1,20
R	CCCM20	1,14	1,10	1,18	1,01	1,06	0,88	0,84	0,92	1,11	1,18	1,17	1,11
R	GISS98	1,18	1,16	1,10	1,07	1,05	0,99	0,97	0,98	1,02	1,05	1,05	1,10
s	CCCM97	1,21	1,21	1,18	1,14	1,16	1,22	1,25	1,25	1,25	1,24	1,23	1,22
s	CCCM20	1,27	1,27	1,31	1,25	1,24	1,20	1,21	1,20	1,20	1,23	1,21	1,24
s	GISS98	1,23	1,21	1,20	1,19	1,16	1,13	1,14	1,16	1,15	1,17	1,21	1,23

R – mesačné úhrny zrážok, s – merná vlhkosť vzduchu, H2075 – 50-ročný horizont, kvocienty sú bezrozmerné

$$R = g^{-1} \int_{t_0}^t \int_{p_c}^0 \omega \frac{ds}{dp} \cdot dp \cdot dt,$$

kde $g \approx 9,8 \text{ m.s}^{-2}$, $\omega = d_p/d_t = -\rho \cdot g \cdot w$ – tzv. generalizovaná vertikálna rýchlosť, w – vertikálna zložka vektora rýchlosti prúdenia (kladná smerom nahor), s – merná vlhkosť vzduchu nad kondenzačnou hladinou p_c , p – tlak vzduchu, t – čas, ρ – hustota vzduchu. Čiastkový tlak vodnej pary (e) a merná vlhkosť vzduchu (s) majú vzťah: $s = 0,622 \cdot e / (p - 0,378 e)$. Predpokladáme pritom, že kondenzovaná vodná para vo forme zrážok okamžite vypadne na zemský povrch. Ďalej predpokladáme, že pokles s pri výstupnom pohybe (pri poklese p) nad hladinou kondenzácie prebieha v súlade s vlhkoadiabatickým procesom. Pri vyššej hodnote s (tab. 3) výstupná rýchlosť w vo všeobecnosti rastie, závisí to od vertikálneho teplotného gradientu a od energie vertikálnej teplotnej instability. Ak berieme do úvahy aj turbulentnú výmenu s a energie, tak môžu byť úhrny zrážok R vyššie o 10 – 50 %. Výpočet inkrementálnych scenárov extrémnych zrážok je založený na predpokladanom vývoji mesačných priemerov T a mesačných priemerov s (Lapin a kol., 2001a, 2002).

Aj z úvahy založenej na zjednodušenej rovnici zrážok (Lapin a kol., 2002) si možno urobiť predstavu o možnom vývoji výnimočných 1 – 5-denných zrážkových situácií v povodí na konci 21. storočia: Predpokladajme, že do r. 2100 vzrastie teplota vzduchu (T) z 10 na 13 °C na hladine 850 hPa a z 15 na 18 °C na hladine 900 hPa, čo pri mernej vlhkosti vzduchu (s) znamená rast z 12 na 14,5 g/kg, teda asi o 21 % (pri oteplení o 4 °C bude rast z 12 na 15,4 g/kg, teda asi o 28 %). Keďže ide o letnú situáciu, bude tu mať význam aj termicky podmienené zrýchlenie konvekcie asi o 10 %, prípadne zrýchlenie výstupu o 10 % z dôvodu väčšej dynamiky synoptické situácie (rýchlosť prúdenia, vplyv turbulencie atď.); platí to najmä pre jún a júl, pre iné mesiace je to zrejme menej. Pri krátkodobých intenzívnych lejakoch je tento efekt ešte výraznejší – spolu asi až o 30 % v týchto mesiacoch. V kratších časových inter-

valoch môže byť zrejme výstupná rýchlosť v búrkových oblakoch aj vyše 10 m.s^{-1} . Uvedený postup sme aplikovali na modelovanie odtoku počas vybraných 1 – 3-denných potenciálne povodňových situácií v povodí Kysuce (Petrovič, 2002) a 1 – 5-denných situácií v povodí horného Hrona (Szolgay a kol., 2002).

Výsledné úhrny zrážok by teda mohli byť v danom dni po oteplení o 3 – 4 °C v lete až o 50 % vyššie (asi 1,25 – kvocient mernej vlhkosti (tab. 3), asi 1,2 – kvocient vplyvu zmeny priemernej vertikálnej rýchlosti (w) a turbulencie; podobne by mohli rásť aj úhrny v iných dňoch 1 – 5-denného obdobia, pri nižšej teplote vzduchu by išlo o menšie výsledné úhrny pri rovnakej vertikálnej rýchlosti). Pri takejto schéme výpočtov nám vychádza, že do konca 21. storočia môžu aj mimoriadne 1 – 5-denné úhrny zrážok vzrásť o 30 – 50 %, ak predpokladáme, že sa budú vyskytovať vhodné cyklónálne alebo instabilné situácie (ak by sa takéto situácie nevyskytli, ani vysoká teplota a vysoká absolútna vlhkosť vzduchu nemôžu zaručiť výskyt zrážok – v lete napr. Perzský záliv, Červené more a iné málozrážkové regióny).

Scenáre konvektívnych a extrémnych zrážok po mesiacoch

Urobme nasledujúce zjednodušenia: rozdeľme najprv problém zmien zrážkových úhrnov na zmeny mesačných zrážkových úhrnov celkovo a pre konvektívne zrážkové úhrny zvlášť. Podľa modelov CCCM97, CCCM20 a GISS98 môžeme očakávať zmeny dlhodobých priemerov zrážkových úhrnov v porovnaní s obdobím 1951 – 1980 pri interpolácii do stredného SR podľa tab. 3, čiže v teplom polroku iba malé zmeny (väčšinou malé poklesy úhrnov, na juhu SR väčšie, na severe menšie). Vo výstupoch modelu GISS98 sú uvedené aj scenáre konvektívnej časti zrážkových úhrnov. Keďže konvektívne zrážky sa v období 1951 – 2000 zvlášť nemerali, nemôžeme tento scenár porovnať s referenčným obdobím, no aj tak naznačuje, že v teplom polroku by mohlo dôjsť k niečo väčšiemu rastu (alebo k menšiemu poklesu) úhrnov

konvektívnych zrážok v porovnaní s celkovými úhrnmi. Keďže v teplom období roka sú úhrny zrážok prevažne z konvektívnych procesov, je zrejme, že zrážky výlučne trvalého charakteru môžu koncom 21. storočia aj výraznejšie poklesnúť (najmä v júni až júli).

Zmeny dlhodobých mesačných priemerov úhrnov zrážok nám veľa nehovorí o zmenách vnútromesačnej štruktúry denných úhrnov zrážok. Predpokladajme, že sa zväčší pravdepodobnosť výskytu dlhších bezzrážkových období, čo priamo indikuje postupný pokles mesačných úhrnov zrážok v letných mesiacoch, najmä v južných uzlových bodoch (juh Maďarska a západ Rumunska) a aj posun letnej polárnej frontálnej zóny (tlakového poľa) severným smerom v porovnaní so širšou súčasnosťou. To bude nepochybne znamenať sústreďenie zrážkových situácií v teplom polroku (najmä v lete) do niekoľkých epizód s veľmi výdatnými zrážkami (ako doteraz v južnej polovici Európy). Aj v jesennom a jarnom období bude zrejme podobná tendencia, kým v zime možno predpokladať nárast počtu dní so zrážkami (najmä trvalého charakteru), pretože pri vyššej teplote vzduchu a cyklonálnom charaktere počasia bude k dispozícii viac atmosférickej vlhkosti na kondenzačné procesy.

Posudzovanie konkrétnych povodňových situácií sme robili rozdielne pre každé povodie. Povodie Kysuce je podstatne menšie, najväčší význam tu majú kritické zrážkové situácie s trvaním do 24 hodín, dlhšie ako 3-denné situácie by zrejme vyžadovali komplexnejšiu analýzu. Z obdobia 1951 – 2001 sme vybrali 54 jednodenných, 40 dvojdenných a 9 trojdenných kritických situácií, pričom asi pri polovici z nich boli identifikované lokálne alebo celoplošné povodňové situácie. Vzhľadom na ich krátke trvanie sme urobili metódou DAD distribúciu denných úhrnov zrážok pre všetky zrážkomerné stanice (9 – 13) na hodinové až 6-hodinové úhrny v tých prípadoch, keď bol dostatočný počet ombrografických meraní. Počas celého roka sú v povodí Kysuce zrejme najzaujímavejšie synoptické situácie B a NEc (tlaková brázda a severovýchodná cyklonálna situácia nad strednou Európou), pri jednodenných úhrnoch aj C (cyklóna nad strednou Európou). Aj v teplom polroku sú tieto situácie v súčasnosti významné, no ich počet (nie význam) bude pravdepodobne klesať. Najväčšie úhrny zrážok sú buď na začiatku periódy, ale môže sa vyskytnúť aj rovnomerné rozdelenie zrážok počas celého 1 – 3-denného obdobia. Najvýznamnejšie náveterné efekty sú pri severovýchodnom až severozápadnom prúdení na hladine 850 hPa.

Povodie horného Hrona (po Banskú Bystricu) je rozsiahlejšie, väčší význam tu zrejme majú 3 – 5-denné zrážkové situácie. Pre uvedené príčiny sme zvlášť spracovali a dynamicko-klimatologicky analyzovali 26 kritických päťdenných situácií, ktoré sa vyskytli prevažne v teplých

Tab. 4. Kvocienty zmien dlhšie trvajúcich denných úhrnov zrážok počas vybraných mimoriadnych 1- až 5-denných epizód v časových horizontoch 2010, 2030 a 2075

Časový horizont	Mesiace					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
2010a	1,07	1,05	1,10	1,13	1,12	1,10
2030a	1,11	1,10	1,16	1,20	1,17	1,15
2075a	1,25	1,29	1,41	1,47	1,42	1,36
2010b	1,18	1,19	1,11	1,15	1,12	1,10
2030b	1,25	1,25	1,17	1,24	1,18	1,14
2075b	1,38	1,41	1,38	1,47	1,37	1,31
2010c	1,07	1,08	1,08	1,08	1,06	1,05
2030c	1,09	1,11	1,11	1,11	1,08	1,07
2075c	1,26	1,25	1,25	1,28	1,28	1,23

podľa modelov: (a) CCCM97, (b) CCCM20, (c) GISS98. Zahnutý je tu vplyv zmien teploty a mernej vlhkosti vzduchu, vertikálnej rýchlosti (w) a turbulencie, maximálna oprava na vplyv zmeny w a turbulenciu je kvociantom $k = 1,2$ v VI a VII pri $dT = 3,5$ °C)

polrokoch v období 1951 – 2001. Synoptická a dynamicko-klimatologická analýza potvrdila, že vo väčšine kritických prípadov môžeme povodie horného Hrona rozdeliť na 4 podoblasti s rozdielnymi náveternými efektmi. Podobne ako v povodí Kysuce sú kritickými synoptické situácie B a C, pričom majú význam aj všetky typy potenciálne povodňového počasia, keď sa pri cyklonálnom zakrivení izobár vyskytuje teplé a veľmi vlhké juhozápadné až juhovýchodné prúdenie na hladine 850 hPa. Vzhľadom na to, že sa vybrali modelové 5-denné situácie, nebolo treba robiť analýzu kritických úhrnov zrážok v hodinovom alebo 6-hodinovom časovom intervale, hoci by to určite bolo prínosom.

Konstruktívna scenárov mimoriadnych 1 – 5-denných zrážkových epizód môže byť založená na 3 princípoch:

- Zoberieme mimoriadne 1 – 5-denné situácie z obdobia 1951 – 2001 a zmeníme ich denné úhrny na jednotlivých staniách v súlade s naznačenými scenármi zmien teploty a vlhkosti vzduchu pre časové horizonty 2010, 2030 a 2075; predpokladajme pritom, že podmienky zavláženia (nasýtenia) povodia budú rovnaké ako v originálnom období, alebo bude predchádzať suchšie obdobie (čo je pravdepodobnejšie, lebo okolo r. 2100 bude asi o 2 – 4 °C vyššia teplota vzduchu, a tým pri rovnakých alebo nižších zrážkach aj vyššia potenciálna evapotranspirácia).

- Pre danú teplotu a vlhkosť vzduchu v časových horizontoch 2010, 2030 a 2075 môžeme vytvoriť stochastickým generátorom počasia náhodnú štruktúru denných úhrnov zrážok na jednotlivých staniách tak, aby v priemere vyhovovala scenárom podľa prvého princípu.

• Môžeme nájsť taký GCM, ktorý má výstup denných úhrnov zrážok a štatisticky ho modifikujeme do jednotlivých staníc podľa experimentálnych údajov z obdobia 1951 – 2001, čím môžeme dostať fyzikálne konzistentné scenáre denných údajov všetkých prvkov vrátane úhrnov zrážok.

Za daných okolností sa nám javí ako najschodnejšia prvá metóda riešenia problematiky. V každom mesiaci od júna po september máme aspoň jednu 1 – 5-dennú epizódu vhodných synoptických situácií. Pre tieto extrémne zrážkové situácie vytvoríme scenáre možného vývoja s dvomi počiatočnými podmienkami nasýtenia povodia. V tab. 4 sú uvedené kvocienty, ktorými vynásobíme všetky denné úhrny zrážok na všetkých staniaciach originálnej 1 – 5-dennej epizódy (použijeme mierne zvýšené scenáre, ak ide o jednodenné úhrny, v rámci ktorých sa vyskytli intenzívne búrky – kvocient $k = 1,25$ až $1,30$ pre mesiace jún a júl, Lapin a kol., 2002). Navrhujeme, aby prvá možnosť nasýtenia povodia tesne pred scenárom novej epizódy bola rovnaká ako na začiatku originálnej epizódy a druhá možnosť bola na nižšej úrovni (napríklad 85 % z originálnej epizódy z referenčného obdobia, bude vyššia potenciálna evapotranspirácia a v lete nižšia vlhkosť pôdy), čo sa dá ovplyvniť aj použitím zrážkových scenárov podľa tab. 3 pre všetky dni mesiaca predchádzajúceho kritickej udalosti a po nej.

V prvom kroku musíme vystačiť so scenármi vytvorenými z epizodických originálnych situácií extrapoláciou podľa scenárov teploty a vlhkosti vzduchu. Takýto postup môžeme aplikovať pri každej z vybraných 54 jednodenných, 40 dvojdenných a 9 trojdenných situácií v povodí Kysuce, no bude to platíť len pre konkrétny dátum situácie a nie pre celé obdobie jún až december. V povodí horného Hrona sa takýto postup dá považovať za korektný pri všetkých vybraných 26 situáciách.

Výsledky uvedené v tomto príspevku predstavujú stručný prehľad ďalšej etapy riešenia vzájomne konzistentných scenárov viacerých klimatických prvkov a extrémov zrážok pre rôzne lokality na Slovensku. V priebehu výpočtov scenárov a porovnávania modelových výstupov a meraných údajov sa síce zistili niektoré rozdiely, ktoré vyplývajú z viacerých zjednodušení zahrnutých do modelov CCCM97, CCCM20 a GISS98, všetky regionálne interpretované výsledky sú však prijateľné ako vstupy do hydrologických modelov. Konštrukcia scenárov zrážkových extrémov potenciálne vyvolávajúcich povodňové situácie je kombináciou metód analógov a GCMs, pričom sa značný dôraz kladie na fyzikálne procesy v oblačnosti pri rastúcej teplote a mernej vlhkosti vzduchu v súvislosti s klimatickou zmenou. Zistené skutočnosti vyvolávajú oprávnenú potrebu

vážne sa zaoberať možnými rizikami rastu extrémov krátkodobých zrážok počas kritických situácií až o 50 %, čo môže vyvolať zvýšené extrémne prietoky aj o viac ako 100 % v porovnaní s historickými povodňami (Szolgay a kol., 2002). Výsledky týchto modelových výpočtov sa dajú využiť aj pri protipovodňovej ochrane, pretože umožňujú kvantifikovať rast rizika lokálnych povodní v súvislosti so zmenou klímy v 21. storočí.

Časť príspevku vznikla použitím výsledkov projektu VTP 27-34 a riešením projektu VEGA No. 1/8255/01.

Literatúra

- Damborská, I., Gaál, L., Lapin, M., Melo, M.: Scenarios of Sea Level and Upper Air Pressure Fields in the Euro-Atlantic Area until 2100, Acta Meteorol. Univ. Comen., 31, 2002, p. 31 – 65.
- Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J., Čunderlík, J.: Modelovanie vplyvu zmeny klímy na režim odtoku v regióne stredného Slovenska. In: NKP SR, 9, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 2000, s. 15 – 38.
- Lapin, M., Damborská, I., Tomlain, J.: Voda v atmosfére. Život. Prostr., 35, 2001, 3, s. 117 – 122.
- Lapin, M., Damborská, I., Melo, M.: Scenáre súborov viacerých vzájomne fyzikálne konzistentných klimatických prvkov. In: NKP SR, 11, SHMÚ a MŽP SR, Bratislava, s. 5 – 30.
- Lapin, M., Melo, M., Damborská, I., Gera, M., Gaál, L., Faško, P., Šťastný, P.: Príprava scenárov klimatických zmien. Záverečná správa časti úlohy 03 z etapy 02.05. Projekt VTP 27-34. Katedra meteorológie a klimatológie FMFI UK a SHMÚ pre VÚVH Bratislava, 2002.
- Melo, M.: Klimatické modely a ich využitie pre odhad klimatických zmien na území Slovenska. Kandidátska dizertačná práca. FMFI UK Bratislava, 2003, 155 s.
- Pekárová, P., Halmová, D., Miklánek, P.: Simulácia režimu odtoku za zmenených klimatických podmienok v povodí Ondavy. J. Hydrol. Hydromech., 44, 1996, 5, s. 291 – 311.
- Petrovič, P.: Záverečná správa z etapy 02.05 Výskum zrážkovo-odtokových vzťahov. Projekt VTP 27-34 Výskum antropogénnych faktorov na vodné systémy. VÚVH Bratislava, 2002.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Kohnová, S., Kubeš, R., Zvolenský, M., Lapin, M., Šťastný, P., Faško, P., Gaál, L.: Analýza povodňového režimu horného Hrona. Záverečná správa VTP 27-34 Výskum vplyvu antropogénnych faktorov na vodné systémy, časť etapy E 04.01. VÚVH, Bratislava, 2002.

Doc. RNDr. Milan Lapin, CSc., Katedra meteorológie a klimatológie Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
lapin@fmph.uniba.sk