

SCENÁRE ÚHRNOV ZRÁŽOK POČAS EXTRÉMNYCH ZRÁŽKOVÝCH SITUÁCIÍ NA SLOVENSKU

Milan Lapin, Marián Melo, Ingrid Damborská, Martin Gera

ABSTRACT

In the paper the review of very high one- to five-day precipitation total scenarios for the 2010, 2030 and 2075 time frames is presented. These totals can potentially cause flash floods in the medium-scale river basins in Slovakia. There is presented briefly also the method of scenarios design for unusually dry periods. As a base the Canadian GCMs CCCM 1997 and CCCM 2000 as well as the U.S.A. GISS 1998 model outputs regionally modified for Slovakia have been used. The measured series of extraordinary high precipitation totals in the river basins Kysuca and upper Hron in the period 1951-2001 have been used as the reference. The year 1992 represents a reference dry and warm year there.

Key words: scenarios of extreme precipitation totals, scenarios of dry periods, GCM outputs regional modification, river basins in Central Slovakia.

ÚVOD

Od klimatológov požadujú najmä hydroológovia, popri scenároch zmien dlhodobých priemerov klimatických prvkov, aj scenáre časových radov denných a mesačných hodnôt klimatických prvkov a tiež aj scenáre rôznych extrémov. Pri extrémnych hodnotách by uvítali scenáre klimatického zabezpečenia (pravdepodobnosti výskytu/opakovania) mimoriadnych zrážkových situácií aspoň na úrovni $p=0,02$, teda raz za 50 rokov. Modely všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs) síce poskytujú vo svojich výstupoch časové rady s rôznym časovým rozlíšením (od denných až po ročné, niekde iba 10-ročné hodnoty), no z pohľadu priestorového rozlíšenia ide vždy o priestorovo zhladené údaje (až na úrovni gridového boxu 300x300 km). Takéto údaje nie sú vhodné na priamu konštrukciu, nielen pri scenároch extrémnych hodnôt, ale ani na scenáre časových radov pre jednotlivé stanice.

V tomto príspevku sa venujeme závažnej problematike – príprave scenárov zmien extrémnych 1- až 5-denných úhrnov zrážok v dvoch povodiach na Slovensku (Kysuca a horný Hron po Banskú Bystricu), okrajovo sa tu zaoberáme aj scenármi teplých a suchých období. Ako príklad časového radu extrémnych úhrnov zrážok sú na obr. 1 uvedené maximá, minimá a priemery z ročných maximálnych denných úhrnov zrážok na 19 staniách v povodí Kysuce. Pri návrhu scenárov sme vychádzali jednak z časových radov pozorovaní extrémnych zrážkových situácií v období 1950-2001, tiež ale aj zo scenárov zmien teploty vzduchu, mernej vlhkosti vzduchu, atmosférických zrážok a prúdenia atmosféry v strednej Európe podľa modelov CCCM 1997 a 2000 (Kanada) a GISS 1998 (USA).

Na konštrukciu scenárov možných zmien extrémnejších zrážkových situácií sme použili zjednodušenú rovnicu zrážok pre usporiadané výstupné pohyby atmosféry

Kontaktné adresy:

Doc. RNDr. Milan Lapin, CSc., lapin@fmph.uniba.sk

RNDr. Marián Melo, PhD., melo@fmph.uniba.sk

RNDr. Ingrid Damborská, CSc., damborska@fmph.uniba.sk

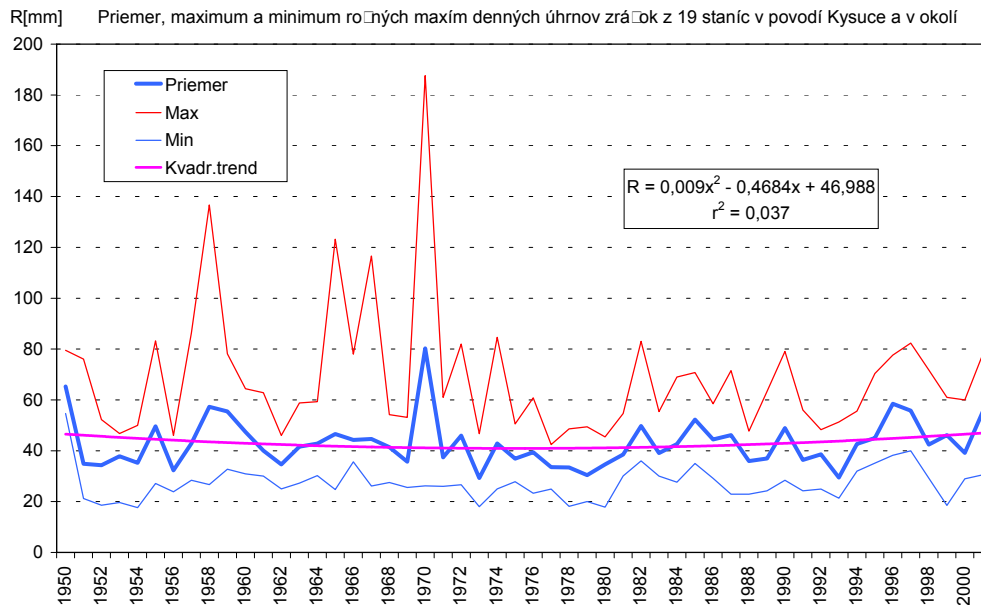
RNDr. Martin Gera, PhD., mgera@fmph.uniba.sk

Katedra meteorológie a klimatológie FMFI UK, Mlynská dolina, Pav. F1, SK-84248 Bratislava

Web: <http://www.dmc.fmph.uniba.sk/>

a expertný odhad zvýšenia intenzity konvektívnych pohybov v teplejšej a vlhšej atmosfére. Výsledkom je návrh scenárov zmien extrémnych 1- až 5-denných úhrnov zrážok v tvare kvocientov.

Predpokladá sa rast týchto úhrnov napriek očakávanému celkovému slabému poklesu alebo malej zmene dlhodobých priemerov úhrnov zrážok.



Obr. 1. Časový rad maxim, minim a priemerov z ročných maxim 24-hodinových úhrnov zrážok nameraných na 19 staniciach v povodí Kysuce a v okolí v rokoch 1950-2001, k priemerom z 19 staníc je pridaný aj kvadratický trend a štvorec korelačného koeficientu r^2 (podobné spracovanie je urobené pre všetky povodia na Slovensku – spolu 557 staníc s takmer kompletnými údajmi).

PREHĽAD VYUŽITIA ZRÁŽKOVÝCH SCENÁROV

Vplyv klimatickej zmeny na hydrologické, ale aj na iné procesy je tesne spojený s možnými zmenami rozhodujúcich klimatických prvkov (teplota vzduchu, úhrny a premenlivosť zrážok, vlhkosť vzduchu, výskyt snehovej pokrývky, slnečná radiácia a oblačnosť, výpar, vlhkosť pôdy, vietor). Dôležitú úlohu tu však hrá aj odozva zmien klimatických prvkov v komplexe iných prírodných procesov, čo značne závisí od geografických, orografických, hydrografických, hydrogeologických, pedologických a iných podmienok konkrétneho územia.

Vzhľadom na to, že uvedené procesy prebiehajú nepretržite a vzájomne sa ovplyvňujú na celom území, je kľúčovou

otázkou výber vhodnej štruktúry klimatických údajov, teda aj klimatických scenárov. 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 v minulosti pripravovali väčšinou iba v tvare územných priemerov v časových horizontoch (u nás pre celé Slovensko a pre 30- alebo 50-ročné horizonty rokov 2010, 2030 a 2075).

Okrem toho boli tiež spracované aj inkrementálne, analógové a kombinované scenáre pre rovnaké časové horizonty (Lapin et al., 1995). Viacerí odborníci z dotknutých socio-ekonomických sektorov využili všetky uvedené scenáre, napr.: Hlavčová et al., 2000, Kostka et al., 2000, Majerčáková et al., 1997, 2001, Mindáš et al., 1996, 2003, Švarenina et al., 1996, Petrovič, 2000, Pekárová et al., 1996, 2000, Szolgay et al., 1997, Špánik et al., 1999, 2000, Takáč, 2002 a i.

Najnovšie verzie klimatických modelov už umožňujú odklon od naznačenej schémy a otvorili sa cesty na prípravu scenárov klimatických časových radov a extrémov. V príspevku prezentujeme novšie výsledky získané v rokoch 2001 až 2003, ktoré boli aj experimentálne overené na vybraných povodiach v SR a v povodiach Hrona a Kysuce (Lapin et al., 2001, 2002, 2003a,b, Szolgay et al., 2002, Petrovič et al., 2002). Venovať sa budeme teda predovšetkým možným hydrologickým aplikáciám novších verzií scenárov.

MODELY VŠEOBECNEJ CIRKULÁCIE ATMOSFÉRY

V súčasnosti sú najrozšírejšími, alebo najpoužívanejšími klimatickými modelmi atmosférické a oceánske modely všeobecnej cirkulácie (AO GCMs). Vo viacerých prípadoch boli GCMs atmosféry a oceánu vyvinuté oddelene. Ich vzájomným prepojením vzniká prepojený model všeobecnej cirkulácie alebo aj prepojený oceánsko-atmosférický model (coupled GCM). Tieto modely tiež zahŕňujú znázornenia krajinnopovrchových procesov, procesy dotýkajúce sa morského ľadu a mnohé ďalšie zložité procesy zahrnuté v klimatickom systéme. V niektorých strediskách vyvinuli oddelene aj modely pre ďalšie zložky klimatického systému. V najnovšej literatúre niektorí autori (Dai et al. 2001) uprednostňujú termín modely klimatického systému, čím lepšie vysti-

hujú aktuálne dosiahnutý pokrok pri klimatickom modelovaní. Podrobnejšie informácie o GCMs prezentuje vo svojich prácach Melo (1996, 2003) a Lapin et al. (2003c).

Podľa IPCC (2001) je analýze extrémnych prípadov v simuláciách klimatických modelov venovaná rastúca pozornosť. Analýza sa týka týchto typov extrémnych udalostí: početnosti tropických cyklón, maximálnej a minimálnej dennej teploty vzduchu, trvania horúceho a studeného obdobia, intenzity a pravdepodobnosti atmosférických zrážok (povodne a suchá). Teplotnými extrémami sa zaoberajú napr. tieto klimatické modely: CCCM (denná variabilita teploty vzduchu, trvanie horúceho a studeného obdobia), CSIRO (denná variabilita teploty vzduchu, extrémne teploty vzduchu), GFDL (index tepla), UKMO (denná variabilita teploty vzduchu). Extrémami atmosférických zrážok sa zaoberajú modely: CCCM (denná variabilita zrážok, trvanie suchého a vlhkého obdobia), GFDL (denná variabilita zrážok), HadCM2b (denná variabilita zrážok, extrémne zrážok), UKMO (denná variabilita zrážok). Niektoré modely študujú aj mimotropické cyklóny: modely CCCM, ECHAM (výskyt a postup týchto cyklón), prípadne tropické cyklóny: modely ARPEGE-C, CCCM, CSIRO, ECHAM, FSU, GFDL, HadCM2, HadAM2, JMA, PMIP, UKMO (napr. početnosť cyklón, intenzita cyklón, ich postup, vlnová aktivita, stred cyklóny, maximálna rýchlosť vetra). Analýza extrémov teploty vzduchu sa v simuláciách klimatických modelov koncentruje hlavne na denné maximum a denné minimum teploty vzduchu pri povrchu, alebo na trvanie horúceho a studeného obdobia. V prípade analýzy extrémov atmosférických zrážok je pozornosť venovaná dennej variabilite anomálií zrážok, intenzívnemu úhrnu zrážok, trvaniu suchého a vlhkého obdobia. Výsledky sa zhodujú s dostupnými pozorovaniami, avšak, na rozdiel od simulácii extrémov teploty vzduchu, sú

extrémy pri zrážkach silne ovplyvnené lokálnymi pomermi. Ďalší rozvoj klimatických charakteristík extrémov je preto, najmä v prípade atmosférických zrážok, ešte stále limitovaný relatívne nízkym horizontálnym rozlíšením globálnych modelov. Aj pri analýze tropických cyklón boli pri použití vyššieho horizontálneho rozlíšenia globálnych modelov dosiahnuté lepšie výsledky (Lapin et al., 2003d; detailnejšie informácie sú v IPCC, 2001).

V najnovších modeloch sa rieši aj problematika výstupov v tvare časových radov denných hodnôt vybraných klimatických prvkov. Tak napr. najnovší model Kanadského strediska pre modelovanie a analýzu klímy (CCCM 2000), ktorý je prepojeným modelom 2. generácie, obsahuje spolu 43 klimatických charakteristík v tvare časových radov denných hodnôt pre obdobie 1961-2100 pre dva IPCC SRES „A2“ a „B2“ emisné scenáre, ktoré berú do úvahy aj s radiačne aktívne plyny a aj aerosóly. So systémom SRES emisných scenárov sa môžeme stretnúť v najnovšej správe IPCC (2001). Štruktúra navrhnutého najnovšieho systému scenárov má spolu 35 scenárov, ktoré môžeme rozdeliť do štyroch hlavných skupín scenárov (A1, A2, B1, B2). Skupine A2 zodpovedá predstava veľmi heterogénneho sveta. Skupina B2 vychádza z predstavy sveta, v ktorom sa kladie dôraz na lokálne riešenie ekonomickej a sociálnej rovnováhy, environmentálnej udržateľnosti rozvoja. Populácia kontinuálne rastie v 21. storočí, avšak pomalšie ako v A2 (Lapin et al., 2003d; detaily scenárov SRES nájdeme na stránkach IPCC:

<http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>).

V prípade výstupov modelu CCCM 2000 sa denné hodnoty týkajú týchto klimatických prvkov: teplota vzduchu vo výške 2 m nad zemským povrchom (°C), priemerná denná maximálna teplota vzduchu (°C), priemerná denná minimálna teplota vzduchu (°C), povrchová teplota vzduchu

(°C), merná vlhkosť vzduchu (kg/kg), merná vlhkosť vzduchu na hladinách 500 hPa a 850 hPa (kg/kg), zrážky (mm/deň), evapotranspirácia (mm/deň), tlak vzduchu na hladine mora (hPa), tlak vzduchu na povrchu (hPa), priemerná rýchlosť vetra v 2 m (m/s), pôdna vlhkosť, oblačnosť, globálne žiarenie, obsah vody v snehovej pokrývke, morský ľad, geopotenciálna výška hladín 500 hPa, 850 hPa a 1000 hPa, teplota vzduchu na hladinách 500 hPa a 850 hPa a mnohé ďalšie charakteristiky (Lapin et al., 1999 až 2003d).

Pri riešení úloh Národného klimatického programu SR (NKP SR) 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), predtým aj CCCM 1997. Použili sme aj najnovší prepojený GCM GISS 1998 z Goddardovho ústavu pre vesmírne štúdie pri NASA v USA (Goddard Institute for Space Studies, New York), Lapin et al. (1999 až 2003d), ktorého výstupy sme v rokoch 2001 až 2003 spracovali do väčších podrobností.

PREDNOSTI A OBMEDZENIA PRÍPRAVY KLIMATICKÝCH SCENÁROV

Pojem fyzikálnej konzistentnosti (plausibility) 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 inkrementálne, teda za akúsi kombináciu vhodných prírastkov (úbytkov) priemerov jednotlivých premenných v porovnaní s priemerami premenných v kontrolnom/referenčnom rade (väčšinou s 1951-1980, tzv. baseline scenario). V minulosti sa najväčšej obľube tešili inkrementálne scenáre, lebo boli jedno-

duché a ľahko zrozumiteľné. Pri novej generácii modelových výstupov GCMs fyzikálna konzistentnosť vyplýva z použitých fyzikálnych rovníc v modeloch a z matematických metód výpočtov. Fyzikálna konzistentnosť je tu zaručená aj v tom prípade keď sú výstupy kontrolnej klímy odlišné od klímy pozorovanej. V priebehu regionálnej modifikácie výstupov GCMs môže (ale nemusí) dôjsť k porušeniu uvedených vzťahov. Pod regionálnou modifikáciou rozumieme prispôbenie veľkosti, variability a niekedy aj extrémov členov radu vo výstupoch GCMs pozorovanej klíme v referenčnom/kontrolnom období, pričom sa predpokladá, že rovnaká modifikácia sa aplikuje aj v modelovom období (IPCC 2001). Výstupy GCMs nereprezentujú reálne sa vyskytujúcu klímu v bode. S určitosťou môžeme predpokladať, že reprezentujú územné priemery premenných v priestore uzlových bodov, 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 regionálnych a lokálnych náveterných a zúveterných efektov (Alpy majú najviac 1000 m n. m. a tvoria s Karpatami jedno ploché pohorie v strednej Európe, pričom Panónska kotlina väčšinou chýba).

Ak máme pri modifikácii výstupov GCMs získať scenáre ako časové rady reprezentujúce jednotlivé stanice, tak musíme predovšetkým nájsť vzťah medzi časovými radmi územných priemerov a časovými radmi na jednotlivých stanicach. Ako sa dalo očakávať, je tento problém najzaujímavejší v prípade mesačných úhrnov zrážok (veľká premenlivosť ročného chodu a priestorovej distribúcie, Lapin et al., 2000 a 2001) a nemá praktický zmysel sa ním zaoberať v prípade mesačných priemerov teploty vzduchu (korelačný koeficient meraných mesačných priemerov medzi stanicami je $r > 0,9$). Horšia je situácia pri posudzovaní priestorovej variability iných prvkov, kde nemáme dostatok podkladov na

výpočet územných priemerov pre jednotlivé mesiace.

Ďalším zo závažných problémov je výber vhodného referenčného obdobia. Obvykle je metóda konštrukcie scenárov klimatickej zmeny podmienená existenciou referenčného obdobia v inštrumentálnom období, ktoré umožňuje porovnávať modelovú klímu (scenáre) a kontrolnú klímu. V čase riešenia projektu Country Study Slovakia sme za referenčné obdobie považovali 30-ročné obdobie 1951-1980. Toto obdobie malo niekoľko výhod (nepatrný časový trend skoro všetkých prvkov, dlhodobé priemery a variabilitu blízku dlhšiemu obdobiu 1901-1990), no aj jednu nevýhodu – je príliš krátke (Marečková et al., 1997). Občas je nevyhnutné použiť iné referenčné obdobia klimatických prvkov, pretože nie sú k dispozícii experimentálne údaje z dohodnutých období. Vtedy sa relatívne hodnoty scenárov prepočítavajú na nové referenčné obdobie pomocou kvocientov (úhrny zrážok) alebo rozdielov (priemery teploty vzduchu) obidvoch referenčných období (tab. 1, obr. 2).

Klíma našej oblasti sa vyznačuje určitým stupňom nestacionarity aj z prirodzených príčin a je riskantné siahať po kratších časových radoch, kalibračných a referenčných obdobiach ako 30 rokov. Dokonca aj 30-ročné obdobia je potrebné pred výpočtami podrobiť analýze na reprezentatívnosť. Vyplýva z nej, že niektoré odchýlky a neregulárnosti časových radov 20- a 30-ročných kĺzavých priemerov zrážkových úhrnov (tab. 1) dosiahli v období 1901-2000 väčšie hodnoty ako predstavujú odchýlky vyplývajúce zo scenárov (kvocienty v tab. 3) pre obdobie 2001-2090. Týka sa to predovšetkým obdobia 1971-1993, ktoré bolo na časti územia Slovenska také suché, že to nemá obdobu za 225 rokov meteorologických meraní v Strednej Európe (Lapin et al., 2001a,b, obr. 2 a 3).

V rokoch 1999 až 2002 sme pripravili časové rady mesačných úhrnov zrážok

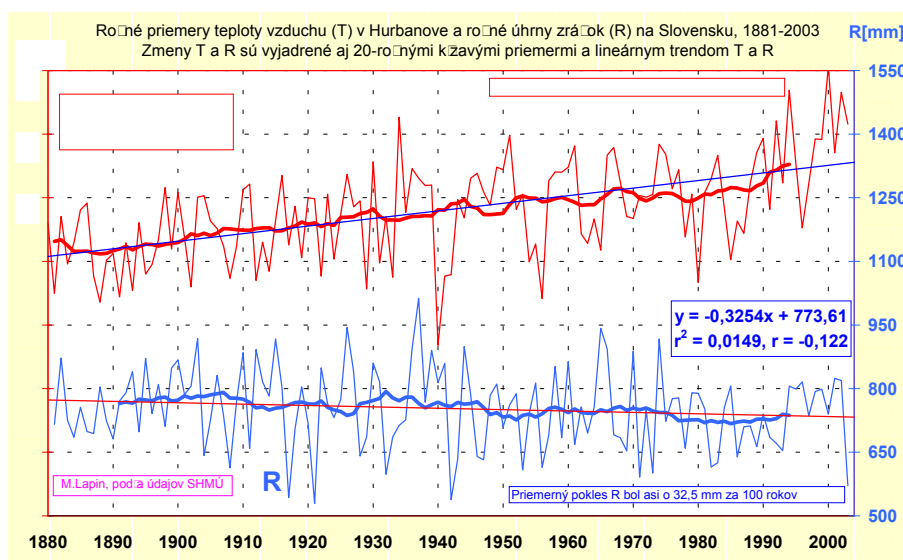
z vyše 50 staníc na Slovensku pre obdobie 2001-2090 ako regionálnu modifikáciu výstupov GCMs CCCM 1997 a CCCM 2000 a analyzovali sme aj možné zmeny výškového atmosférického prúdenia v strednej Európe z výstupov CCCM 2000 a GISS 1998 (Lapin et al., 2001b, 2003c). Ako sme už uviedli vyššie, výstupy GCMs neobsahujú vhodné údaje na prípravu scenárov zmien extrémnych prípadov počasia v konkrétnej malej oblasti, prípadne na jednotlivých

staniciach. V ďalšom texte sa budeme zaoberať predovšetkým prípravou scenárov zmien extrémnych zrážkových epizód. Metodika takejto modifikácie výstupov GCMs už presahuje rozsah, ktorý zaručuje zachovanie fyzikálnej konzistentnosti výstupov GCMs, musíme preto prijať také opatrenia, aby boli výsledky akceptovateľné ako klimatické scenáre na odhad možných dôsledkov zmeny extrémov počasia.

Tab. 1. Porovnanie priemerov mesačných a ročných úhrnov zrážok [mm] za rôzne obdobia s normálom pre obdobie 1901-1950 v Hurbanove (tučne sú 2 najvyššie a 2 najnižšie kvocienty).

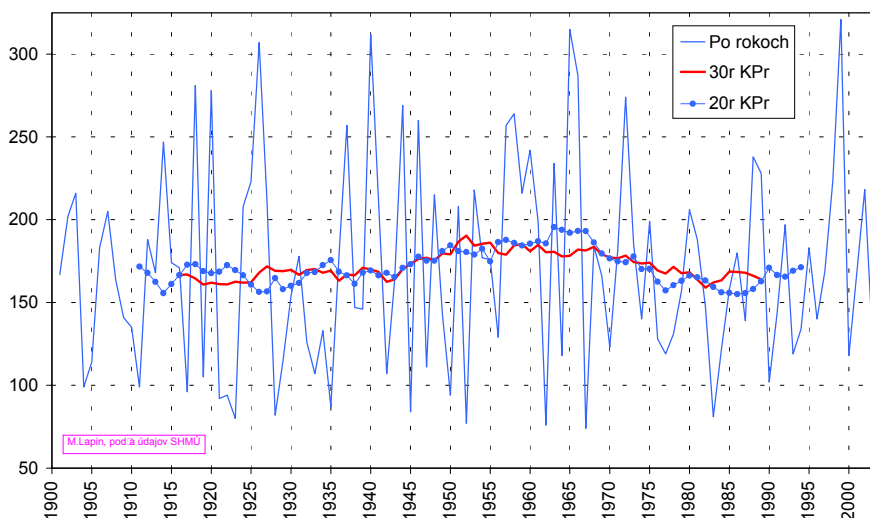
Hurbanovo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
1901-1950	37,2	34,6	38,5	44,8	62,3	57,9	58,8	49,8	44,3	50,9	52,6	49,6	581,4
1951-1980	33,3	34,4	28,6	41,4	51,6	68,9	61,0	52,1	40,7	38,3	54,0	42,4	546,8
Q k 01-50	0,896	0,994	0,743	0,924	0,828	1,190	1,036	1,048	0,918	0,753	1,026	0,855	0,941
1951-2000	31,7	31,5	29,1	39,5	54,3	65,6	58,8	51,5	42,3	38,7	53,0	42,4	538,3
Q k 01-50	0,853	0,908	0,756	0,882	0,871	1,132	0,999	1,035	0,954	0,761	1,008	0,854	0,926
1961-1990	34,0	34,1	26,6	38,9	55,7	60,9	50,7	57,7	38,9	32,2	53,8	39,8	523,4
Q k 01-50	0,916	0,984	0,691	0,868	0,894	1,051	0,863	1,160	0,878	0,634	1,022	0,802	0,900
1971-2000	32,4	27,3	27,4	38,9	56,8	59,3	56,5	52,7	42,9	38,7	51,0	39,1	523,0
Q k 01-50	0,871	0,787	0,712	0,869	0,911	1,023	0,961	1,058	0,969	0,762	0,970	0,788	0,900
1981-2000	29,3	27,0	29,9	36,7	58,3	60,6	55,5	50,5	44,7	39,4	51,6	42,4	525,6
Q k 01-50	0,788	0,779	0,775	0,818	0,934	1,046	0,944	1,015	1,007	0,774	0,981	0,853	0,904

Zdroj: Slovenský hydrometeorologický ústav



Obr. 2. Ročné priemery teploty vzduchu (T) v Hurbanove a ročné úhrny zrážok (R) na Slovensku (vypočítané z 203 staníc) v období 1881-2003 (plus lineárny trend a 20-ročné kľzavé priemery).

R [mm] Úhrny za letá, 30-ročné a 20-ročné klzavé priemery letných zrážok v Hurbanove, 1901-2003



Obr. 3. Úhrny zrážok v lete (jún-august), 20-ročné a 30-ročné klzavé priemery letných úhrnov zrážok v Hurbanove v období 1901-2003 (klzavé priemery sú v strede intervalov).

SCENÁRE EXTRÉMOV KRÁTKODOBÝCH ZRÁŽOK

Pre viaceré aplikácie sú nevyhnutné vstupy časových radov alebo individuálnych úhrnov extrémnych zrážkových situácií, lebo práve počas alebo po týchto udalostiach môže vzniknúť mimoriadna situácia s veľkými materiálnymi škodami. Problém scenárov možného vývoja extrémov zrážok v podmienkach klimatickej zmeny sa dá riešiť prinajmenšom dvomi spôsobmi. 1) 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 (tab. 5) riešiť problém tak, že tam infiltrujeme historický extrém. 2) Oveľa pravdepodobnejším sa zdá prípad so zmenenými extrémami, pretože to priamo vyplýva z fyzikálneho mechanizmu vzniku extrémov 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 otepnenie dávajú scenáre rastu mesačných

priemerov teploty vzduchu (obr. 4). Na druhej strane, aj extrémne suché obdobia budú zrejme z pohľadu deficitu vody v atmosfére a v pôde nepriaznivejšie ako historické prípady.

Jednoduchý vzťah na výpočet úhrnu zrážok R za časový interval t_0 až t pri usporiadaných výstupných pohyboch má tvar (Zikmunda, 1966, Lapin et al., 2002):

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

kde $g \approx 9,8 \text{ m.s}^{-2}$, $\omega = dp/dt = -\rho \cdot g \cdot w$ – 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. Parciálny tlak vodnej pary (e) a merná vlhkosť vzduchu (s) majú vzťah: $s = 0,622 \cdot e/(p - 0,378 e)$. Predpokladáme pritom, že skondenovaná 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 (tab. 2, obr. 5). Pri vyššej hodnote s výstupná rýchlosť w vo všeobecnosti rastie, závisí to od vertikál-

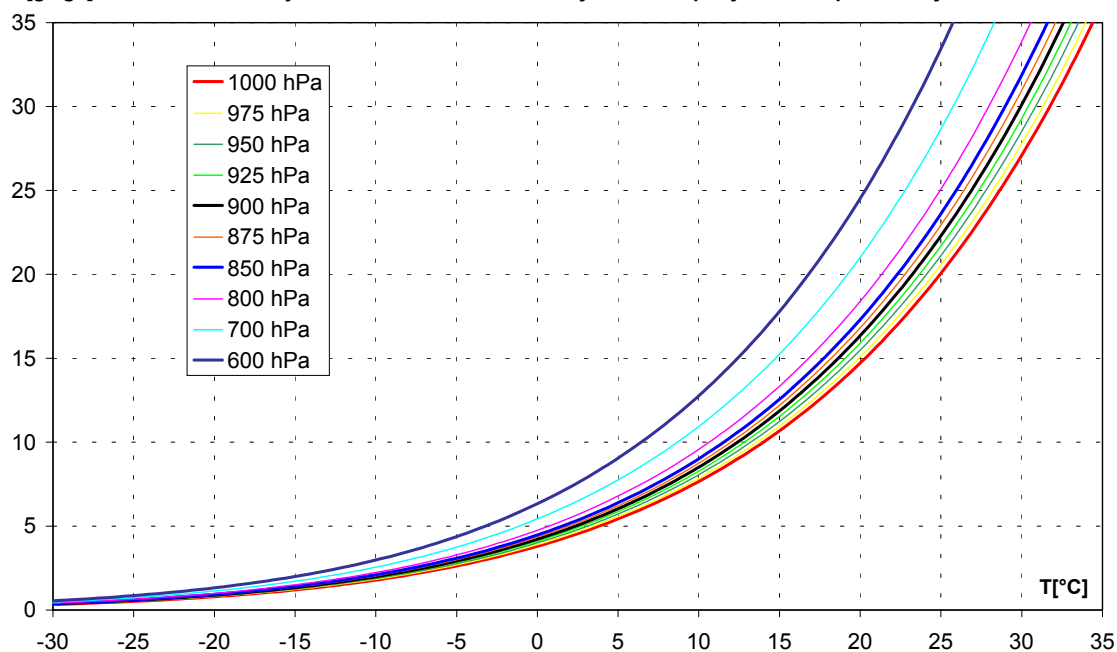
neho teplotného gradientu a od energie vertikálnej teplotnej instability. Ak berieme do úvahy aj turbulentnú výmenu mernej vlhkosti a energie, tak môžu byť úhrny zrážok R vyššie o 10 až 50%. Vý-

počet takýchto inkrementálnych scenárov extrémnych zrážok je založený na predpokladanom vývoji mesačných priemerov T a mesačných priemerov s .

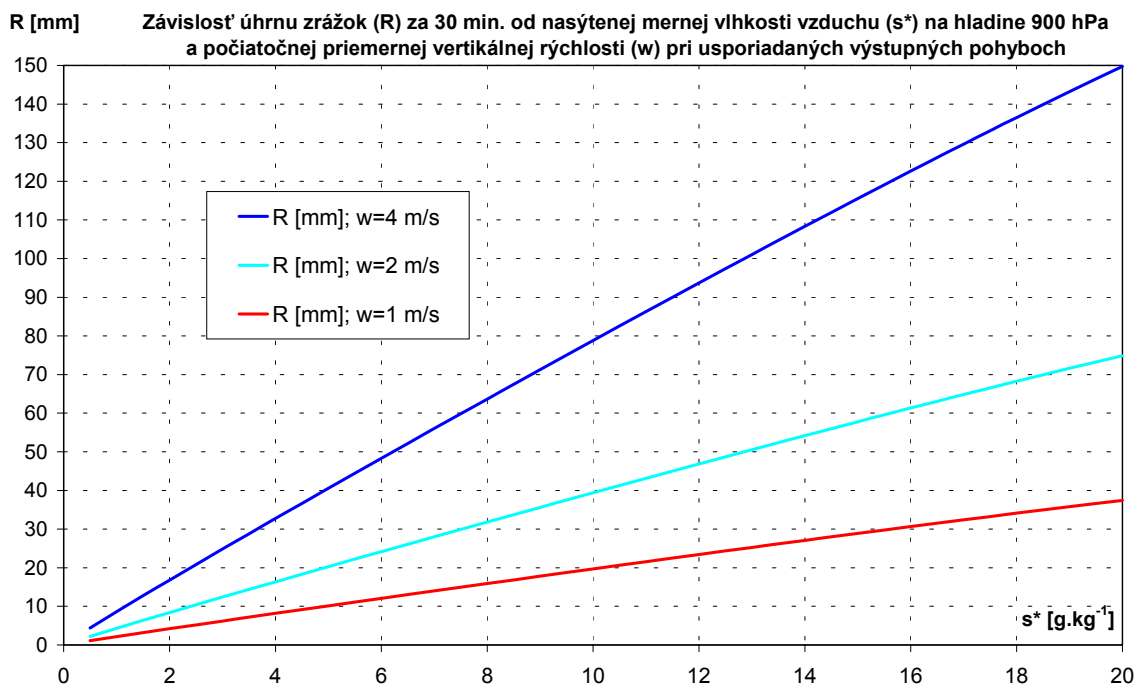
Tab. 2. Inkrementálne scenáre 0,5-hodinových, 3-hodinových a 24-hodinových úhrnov zrážok [mm] podľa zjednodušenej rovnice zrážok (Lapin et al., 2002); w – počiatočná vertikálna rýchlosť prúdenia na hladine kondenzácie 900 hPa; horná hladina výstupu 200 hPa (spresnený výpočet).

Kondenzačná hladina 900 hPa Merná vlhkosť vzduchu (s^*) na hladine 900 hPa v stave nasýtenia v g.kg^{-1}	30 minútové zrážky			180 minútové zrážky			24 hodinové zrážky		
	Priemerná w v m.s^{-1} na hladine 900 hPa			Priemerná w v m.s^{-1} na hladine 900 hPa			Priemerná w v m.s^{-1} na hladine 900 hPa		
	1,0	2,0	4,0	0,5	1,0	2,0	0,1	0,2	0,4
0,5	1,1	2,2	4,4	3,3	6,7	13,3	5,3	10,6	21,3
1,0	2,2	4,3	8,6	6,5	12,9	25,9	10,4	20,7	41,4
1,5	3,2	6,4	12,7	9,6	19,1	38,2	15,3	30,6	61,2
2,0	4,2	8,4	16,8	12,6	25,2	50,4	20,2	40,3	80,7
4,0	8,2	16,4	32,7	24,6	49,1	98,2	39,3	78,6	157,2
10,0	19,7	39,4	78,8	59,1	118,2	236,4	94,6	189,1	378,2
16,0	30,7	61,3	122,6	92,0	184,0	367,9	147,2	294,4	588,7
20,0	37,4	74,9	149,7	112,3	224,6	449,2	179,7	359,4	718,8

$s^*[\text{g.kg}^{-1}]$ Závislosť mernej vlhkosti vzduchu v stave nasýtenia od teploty vzduchu pre hladiny 1000 - 600 hPa



Obr. 4. Závislosť mernej vlhkosti vzduchu v stave nasýtenia (s^*) [g.kg^{-1}] od teploty vzduchu (T) pre tlakové hladiny od 1000 do 600 hPa.



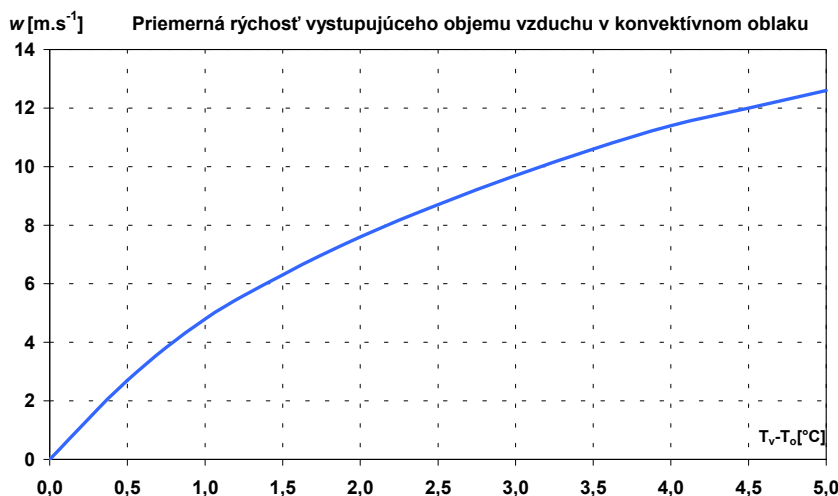
Obr. 5. Závislosť úhrnu zrážok (R) od nasýtenej mernej vlhkosti vzduchu (s^*) na hladine 900 hPa, ktoré vypadnú pri usporiadaných výstupných pohyboch s počiatočnou rýchlosťou 1, 2 a 4 m.s⁻¹ po hladinu 200 hPa za 30 minút (ukážka z výpočtov; všetka skondenzovaná voda okamžite vypadne na zemský povrch ako zrážky; spresnený výpočet oproti údajom v Lapin et al., 2002).

Z grafu na obr. 4 je vidieť pomerne prudký rast mernej vlhkosti s^* na všetkých hladinách kondenzácie pri raste teploty vzduchu T . To sa premietne aj do úhrnov zrážok R pri usporiadaných výstupných pohyboch (obr. 5; neberú sa tu do úvahy iné vplyvy).

Odhad zmeny rýchlosti vystupujúceho objemu vzduchu (w_2-w_1) pri termickej konvekcií a vlhkolabilnom zvrstvení môžeme urobiť zjednodušene aj z termodynamického diagramu nasledujúcou úvahou: nech na 900 hPa hladine je 20 °C pri stave nasýtenia a je počiatočný vertikálny gradient v okolí konvektívnej oblačnosti $\gamma = 1,0$ °C na 100 m výšky; po hladinu 700 hPa klesne teplota vzduchu vo vystupujúcom objeme na 10,8 °C, čo je oproti okoliu o 11,1 °C viac (toto môžeme považovať za hodnotu blízku najvyšším pozorovaným rozdielom $T_v - T_o$ v našich podmienkach); ak štartujeme pri teplote vystupujúcej častice 24 °C, tak dosiahne na 700 hPa hladine 15,6 °C, čo je oproti okoliu o 12,4 °C viac, čiže asi o 11% nárast rozdielu. Ďalším faktorom

zrýchľujúcim kondenzáciu je intenzívnejšia turbulencia, pri vyššej teplote nasýteného vzduchu, ktorá má porovnateľný význam ako rozdiel teplôt, teda aj vertikálny prenos vlhkosti vzduchu by sa mohol na základe takejto úvahy na hladine 700 hPa zvýšiť najmenej o 20 až 25% po raste teploty vzduchu o 4 °C.

Podľa grafických pomôcok z publikácie A.S. Zvereva, 1986 (obr. 6) je pri priemernom rozdieli teploty vzduchu medzi hladinou kondenzácie a hornou hranicou konvekcie oproti okoliu oblaku 4 °C ($T_v - T_o$) priemerná vertikálna rýchlosť vystupujúceho objemu častice v konvektívnom oblaku asi $w = 11,4$ m.s⁻¹ a pri 2 °C asi $w = 7,6$ m.s⁻¹. Pri raste rozdielu $T_v - T_o$ z 2 na 4 °C ide teda o rast w zhruba o 50%. Silná turbulencia do určitej miery môže brzdiť veľké vystupujúce objemy vzduchu pri termickej konvekcií, no merania potvrdzujú, že napriek tomu sa s rastúcou turbulenciou zosilňuje prenos vlhkosti vertikálnym smerom nahor, a teda sa zosilňuje aj kondenzácia a intenzita zrážok.



Obr. 6. Priemerná rýchlosť vystupujúceho objemu vzduchu (w) v konvektívnom oblaku v závislosti od priemerného rozdielu teploty vystupujúceho objemu vzduchu (T_v) a vzduchu v okolí oblaku (T_o), prevzaté z publikácie Zverev (1986).

Pri krátkodobých intenzívnych lejakoch je tento efekt určite ešte výraznejší – predpokladajme, že sa podieľa na raste zrážok až o 20% v VI a VII. Je zrejmé, že v kratších časových intervaloch môže byť výstupná rýchlosť v búrkových oblakoch aj vyše 10 m.s⁻¹. Uvedený postup sme aplikovali na hodnotenie odtoku počas vybraných 1- až 3-denných potenciálnych povodňových situácií v povodí Kysuce (Petrovič et al., 2002) a 1- až 5-denných situácií v povodí horného Hrona (Szolgay et al., 2002, Lapin et al., 2003a).

Výsledné úhrny zrážok by mohli teda byť v danom dni po oteplení o 3 až 4 °C v lete až o 50% vyššie (1,25 – kvocient zmeny mernej vlhkosti, 1,20 – kvocient vplyvu zmeny priemernej vertikálnej rýchlosti (w) a turbulencie; rásť by mohli byť podobne aj úhrny v iných dňoch 1- až 5-denného obdobia, pri nižšej teplote vzduchu by išlo o menšie úhrny pri rovnakej vertikálnej rýchlosti). Pri takejto schéme výpočtov nám vychádza, že do konca 21. storočia môžu aj mimoriadne 1- až 5-denné úhrny zrážok vzrásť o 30 až 50% ak predpokladáme, že sa budú

vyskytovať vhodné cyklonálne alebo instabilné situácie (ak by sa vhodná cyklonálna alebo instabilná situácia nevykytla, ani vysoká teplota a vysoká absolútna vlhkosť vzduchu nemôžu zaručovať výskyt zrážok – v lete napr. Perzský záliv, Červené more a iné málozrážkové regióny).

SCENÁRE KONVEKTÍVNYCH A EXTRÉMNYCH ZRÁŽOK PO MESIACHOCH

Urobme nasledujúce zjednodušenia: Rozdeľme najprv problém zmien zrážkových úhrnov na zmeny mesačných zrážkových úhrnov celkove a zmeny konvektívnych zrážkových úhrnov zvlášť. Podľa modelov CCCM 1997, CCCM 2000 a GISS 1998 môžeme očakávať zmeny dlhodobých priemerov zrážkových úhrnov v porovnaní s obdobím 1951-1980 pri interpolácii do stanice Čadca podľa tab. 3, čiže v teplom polroku iba malé zmeny (väčšinou malé poklesy úhrnov). Vo výstupoch modelu GISS98 sú uvedené aj scenáre konvektívnej časti zrážkových úhrnov. Keďže konvektívne zrážky sa v období 1951-1980 zvlášť ne-

merali, nemôžeme tento scenár konkretizovať ako porovnanie s obdobím 1951-1980, no aj tak naznačuje, že v teplom polroku by mohlo dôjsť k o niečo väčšiemu rastu (menšiemu poklesu) úhrnov konvektívnych zrážok v porovnaní

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

Tab. 3. Scenáre (kvocienty) zmien mesačných úhrnov zrážok (kvocienty sú bezrozmerné) v 50-ročných horizontoch (H) pre Kysucu v porovnaní s normálom 1951-1980 podľa modelu CCCM 1997 (a) a CCCM 2000 (b), Kanada a GISS 1998 (c), USA (Dekády - kvocienty zmien úhrnov zrážok po dekádach bez hladenia ročného chodu; pri verziách pre časové horizonty je ročný chod hladný podľa vzťahu $x_i = (x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1})/4$; 50-ročný horizont 2075 je 2051-2100 atď.).

H	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
(50-ročné horizonty v porovnaní 1951-1980)												
2010a	1,07	1,04	1,08	0,93	0,95	0,93	0,89	1,02	0,98	1,11	1,09	1,03
2030a	1,10	1,07	1,11	0,98	0,99	0,94	0,88	1,02	0,98	1,13	1,13	1,07
2075a	1,32	1,22	1,17	0,98	0,96	0,87	0,84	1,01	0,95	1,11	1,21	1,24
2010b	1,08	1,05	1,06	0,94	0,97	0,93	0,90	1,05	1,01	1,14	1,11	1,03
2030b	1,11	1,10	1,12	0,95	0,94	0,88	0,85	1,00	0,99	1,14	1,14	1,06
2075b	1,21	1,20	1,19	0,98	0,97	0,90	0,84	1,02	1,05	1,20	1,20	1,13
2010c	1,02	1,00	1,01	1,04	1,05	1,02	1,00	1,05	1,10	1,05	1,02	1,03
2030c	1,00	1,03	1,05	1,05	1,06	1,05	1,02	1,06	1,12	1,10	1,03	0,99
2075c	1,20	1,19	1,13	1,10	1,08	1,03	1,01	1,02	1,06	1,10	1,11	1,14

Pokračovanie tab. 3 pre vybrané desaťročia 2051-2060 a 2091-2100.

Dekády	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
2051-60a	1,141	1,156	1,100	1,014	0,877	0,884	0,903	0,986	0,822	1,081	1,224	1,119	1,001
2091-00a	1,541	1,370	1,157	1,067	1,020	0,929	0,773	0,935	0,928	1,305	1,197	1,339	1,084
2051-60b	1,081	1,262	1,225	1,053	0,882	0,983	0,784	1,133	0,988	0,993	1,103	1,088	1,020
2091-00b	1,296	1,177	1,168	0,835	1,058	0,793	0,768	1,053	1,185	1,316	1,289	1,212	1,054

Zmeny dlhodobých mesačných priemerov úhrnov zrážok nám veľa nehovoria o zmenách vnútromesačnej štruktúry denných úhrnov zrážok. Predpokladajme, že sa zväčší pravdepodobnosť výskytu dlhších bezzrážkových období, čo priamo signalizuje 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 (zmena tlakového poľa) severným smerom v porovnaní s širšou súčasnosťou. To bude nepochybne znamenať sústredenie zrážkových situácií v teplom polroku (najmä v lete) do niekoľkých epizód s veľmi výdatnými zrážkami (tak je to dnes v južnej polovici Európy). Aj v jesennom a jarnom období bude zrejme podobná tendencia, kým v zime je možné

predpokladať zväčšenie počtu dní so zrážkami (prevažne trvalého charakteru), pretože pri vyššej teplote vzduchu a pri prevažne cyklonálnom charaktere počasia bude k dispozícii viac atmosférickej vlhkosti na kondenzačné procesy.

Posudzovanie konkrétnych povodňových situácií sme robili pre obidve povodia rozdielne. 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 aj identifikované lokálne alebo celoplošné povodňové situácie. Vzhľadom na ich krátke trvanie sme urobili metódou DAD (WMO, 1969)

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. Z 3 situácií na konci obdobia sme mali k dispozícii aj mapy zlúčenej radarovej informácie (CERAD). Počas celého roka sú v povodí Kysuce zrejme najzaujímavejšie synoptické situácie B a NEc (tlaková brázda a severovýchodná cyklónálna situácia nad strednou Európou), pri 1-denných úhrnoch aj C (cyklóna nad strednou Európou). Aj v teplom polroku sú tieto situácie teraz významné, no ich početnosť (nie význam) bude pravdepodobne klesať. Takéto synoptické situácie majú zvyčajne v povodí Kysuce nasledujúci priebeh: Predchádzajúci deň – predná strana brázdy (alebo cyklóny nad centrálnym Stredomorím až strednou Európou) s relatívne teplým juhozápadným (cez juhovýchod) až severovýchodným prúdením vzduchu s vysokou absolútnou vlhkosťou; 1.-2. deň – prechod frontu alebo osi brázdy; 2.-3. deň – zadná strana brázdy alebo cyklóny tesne za frontom; 3. deň – vzdľavovanie sa osi brázdy alebo frontu s postupným ustávaním zrážok. Najväčšie úhrny zrážok sú buď na začiatku periódy, môže sa vyskytnúť ale aj rovnomerné rozdelenie zrážok počas celého 1- až 3-denného obdobia. Najvýznamnejšie náveterné efekty sú pri NE až NW prúdení na hladine 850 hPa.

Povodie horného Hrona (po Banskú Bystricu) je rozsiahlejšie, najväčší význam tu majú zrejme 3- až 5-denné zrážkové situácie. Pre uvedené príčiny sme zvlášť spracovali a dynamicko-klimatologicky analyzovali kritických 26 päťdenných situácií, ktoré sa vyskytli prevažne v teplých polrokoch rokov 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 také typy potenciálne povodňového počasia keď sa pri cyklónálnom zakrivení izobár vyskytuje teplé a veľmi vlhké SW až SE prúdenie na hladine 850 hPa. Vzhľadom na to, že sa vybrali modelové 5-denné situácie nebolo potrebné urobiť aj analýzu kritických úhrnov zrážok v hodinovom alebo 6-hodinovom časovom kroku, hoci by to určite bolo prínosom.

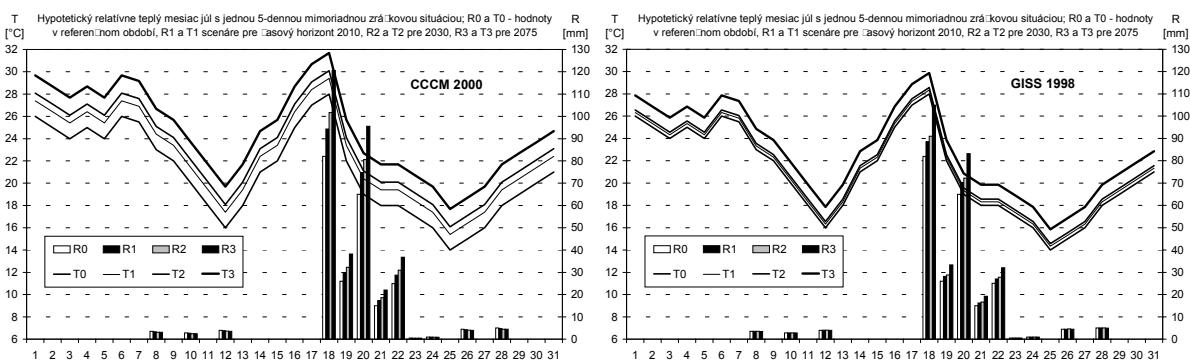
Konštrukciu scenárov mimoriadnych 1- až 5-denných zrážkových epizód sme založili na nasledujúcich predpokladoch: Zoberieme vyskytnuvšie sa mimoriadne 1- až 5-denné situácie z obdobia 1951-2001 a zmeníme ich denné úhrny na jednotlivých staniách v súlade s naznačenými scenármi zmien teploty a vlhkosti vzduchu pre časové horizonty 2010, 2030 a 2075; predpokladajme pritom, že 1) podmienky zavlaženia (nasýtenia) povodia budú rovnaké ako v originálnom období, alebo 2) bude predchádzať suchšie obdobie (čo je pravdepodobnejšie, lebo bude okolo roku 2100 asi o 2-4 °C vyššia teplota vzduchu, a tým pri rovnakých alebo nižších zrážkach aj vyššia potenciálna evapotranspirácia). Za daných okolností riešenia problematiky sa nám javí ako najschodnejšia táto metóda, hoci by sa dalo diskutovať aj o odlišných prístupoch. V každom mesiaci od apríla po september máme aspoň jednu 1- až 5-dennú epizódu charakteru citlivých synoptických situácií. Pre tieto extrémne zrážkové situácie vytvoríme scenáre možného vývoja s uvedenými dvomi počiatočnými podmienkami nasýtenia povodia (vlhkosťou pôdy). V tab. 4 sú kvocienty, ktorými vynásobíme všetky denné úhrny zrážok na všetkých staniách originálnej 1- až 5-dennej epizódy (použijeme mierne zvýšené scenáre ak ide o 1-denné úhrny, v rámci ktorých sa vyskytli intenzívne búrky – kvocient $k = 1,25$ až $1,30$ pre mesiace jún a júl, inak sú nižšie, (Lapin et al., 2002, Szolgay et al., 2002). Ukážka modelových príkladov scenárov mimoriadnej 5-dennej zrážkovej situácie po suchom období je na obr. 7.

Tab. 4. Kvocienty zmien dlhšie trvajúcich denných úhrnov zrážok počas vybraných mimoriadnych 1- až 5- denných epizód podľa modelu CCCM 1997 (a) a CCCM 2000 (b) a GISS 1998 (c) v časových horizontoch 2010, 2030 a 2075 (zahrnutý je tu vplyv zmien teploty a mernej vlhkosti vzduchu, vertikálnej rýchlosti (w) a turbulencie, maximálna oprava na vplyv zmeny w a turbulenciu je kvocientom $k = 1,2$ pri $dT = 3,5$ °C).

MESIACE						
Horizont	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

Je zrejme, že prvá možnosť nasýtenia povodia tesne pred scenárom novej epizódy môže byť rovnaká ako na začiatku originálnej epizódy z referenčného obdobia a druhá možnosť by mohla byť na nižšej úrovni, napríklad 85% z originálnej epizódy z referenčného obdobia. Koncom 21. storočia bude vyššia poten-

ciálna evapotranspirácia a v lete aj podstatne nižšia vlhkosť pôdy. To sa dá ovplyvniť aj použitím zrážkových scenárov podľa tab. 3 pre všetky dni mesiaca, ktoré predchádzajú kritickej 1- až 5- dennej udalosti. Prvé výpočty boli realizované pre povodie Hrona (Lapin et al., 2003a).



Obr. 7. Hypotetický relatívne teplý mesiac s jednou mimoriadnou 5-dennou zrážkovou situáciou (R0 a T0 denné hodnoty zrážok a teploty vzduchu v nejakom referenčnom období; R1 a T1 scenáre pre časový horizont roku 2010, R2 a T2 pre 2030, R3 a T3 pre 2075 podľa modelu CCCM 2000 (vľavo) a podľa GISS 1998 vpravo).

Po spracovaní všetkých výnimočných 1- až 5- denných situácií si už môžeme dovoliť vytvoriť aj modelové 1- až 5- denné synoptické situácie v horizontoch 2010, 2030 a 2075, no iba pre typy B a NEc (pri 1-denných aj C) pre Kysucu a pre typy B a C pre 5-denné epizódy pre Hron. Pri ostatných synoptických typoch musíme

vystačiť so scenármi vytvorenými z epizodických originálnych situácií extrapoláciou podľa scenárov teploty a vlhkosti vzduchu. Taký postup môžeme aplikovať pri každej z 54 vybraných 1-denných, 40 vybraných 2-denných a 9 vybraných 3-denných situácií v povodí Kysuce, no bude to platiť len pre kon-

krétny dátum situácie a nie pre celé obdobie apríl až december. V povodí horného Hrona sa takýto postup dá považovať za korektný pri všetkých vybraných 26 situáciách. Vybrané ukážky charakteru zrážok počas extrémnych epizód z obdobia 1951-2002 sú detailnejšie uvedené v Lapin et al., 2002.

Postup aplikácie scenárov extrémnych zrážok: Nechávame na riešiteľoch modelovania priebehu scenárov potenciálnych povodňových situácií, že aké detailnejšie štruktúry scenárov použijú. V každom prípade je však v porovnaní s širšou súčasnosťou treba počítať koncom 21. storočia v teplom polroku s vyššou teplotou vzduchu o 2-4 °C, s vyššou mernou vlhkosťou vzduchu v dolnej troposfére o 15-30%, s intenzívnejšími prejavmi cyklonálnych a búrkových situácií pre jún a júl aspoň s koeficientom $k = 1,2$ (o 20%) ale tiež s dlhšími málozrážkovými a suchými periódami.

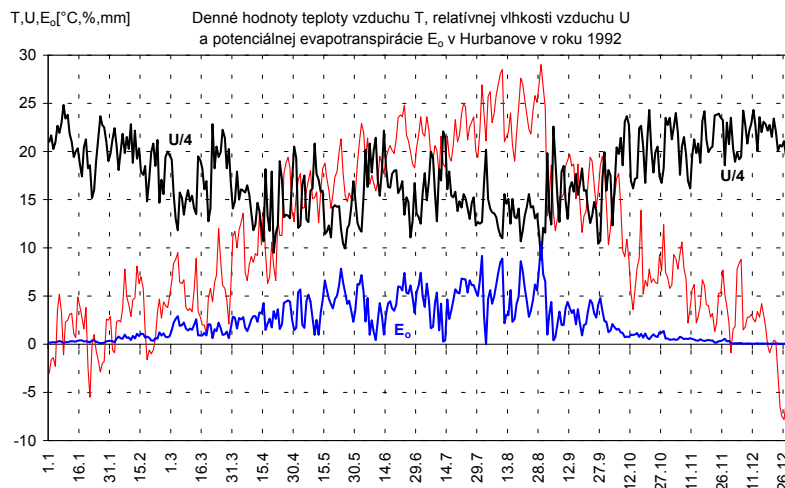
SCENÁRE MIMORIADNE TEPLÝCH A SUCHÝCH PERIÓD

Popri extrémoch charakteru viacdenných vysokých úhrnov zrážok sú dlhé teplé a suché periódny rovnako nebezpečné, alebo aspoň škodlivé, pre vodné hospodárstvo, ekosystémy, lesné a poľné hospodárstvo, prípadne aj inde. Ako príklad môžeme uviesť rok 1992, keď na Slovensku najmä v auguste vyvrcholilo horúce a málozrážkové počasie s dôsledkami sucha. Podobné prípady sa novšie vyskytli aj v rokoch 2000 a 2003.

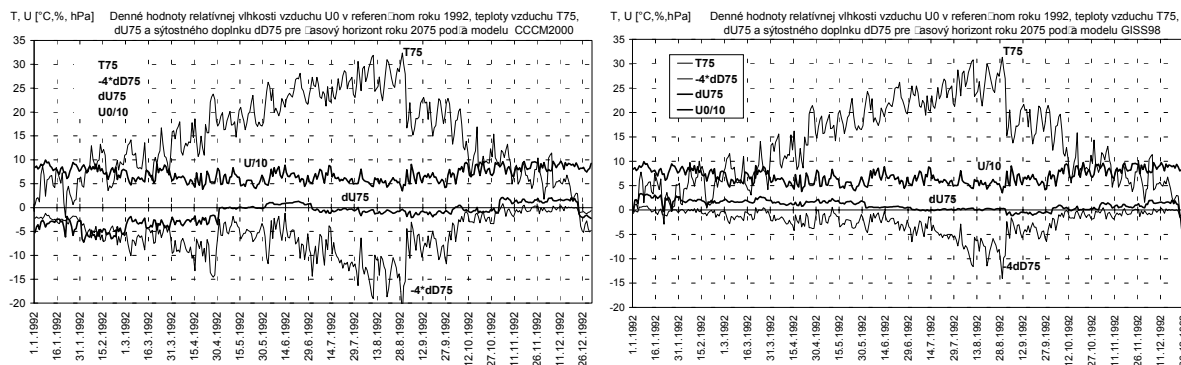
Metóda prípravy takýchto scenárov úpravou údajov z referenčného obdobia podľa hodnôt scenárov klimatickej zmeny je najjednoduchšia, najčastejšie sa používa a je aj najrýchlejšie aplikovateľná. Je tiež zrejme, že môže byť v dobrej zhode so skutočnosťou v najbližších

desaťročiach. V neskorších desaťročiach však metodika vyžaduje zahrnutie možných zmien variability údajov, odlišného časového priebehu a distribúcie denných, hodinových a extrémnych hodnôt. Uvedme teraz stručne hlavné princípy tejto jednoduchej metódy (Lapin et al., 2003d, Tomlain, 1999).

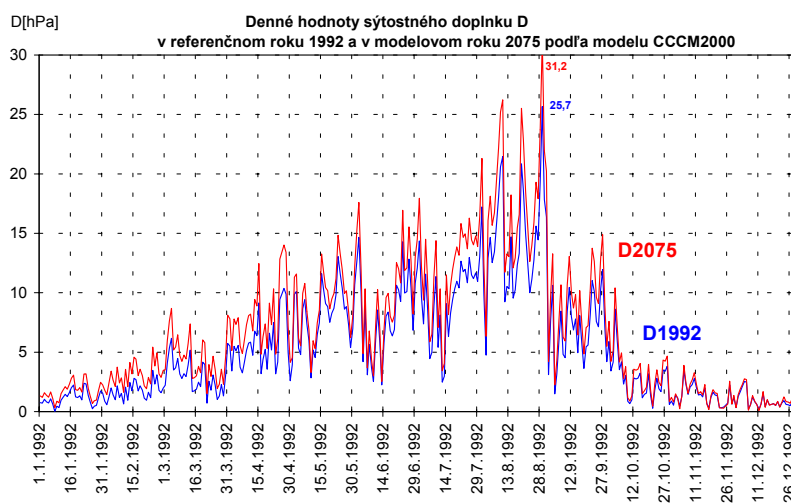
Prvé analýzy naznačili, že je možné očakávať iba nevýznamnú zmenu variability mesačných teplotných a zrážkových údajov v najbližších desaťročiach oproti obdobiu 1901-1995 smerom k jej rastu pri mesačných hodnotách. To potvrdzujú aj výstupy modelov CCCM a GISS. Pravdepodobne väčšie zmeny variability je možné očakávať až po roku 2050 (napr.: Lapin et al., 1998, 2001). Odporúčame teda pri tejto metóde prípravy scenárov použiť časové rady mesačných alebo denných hodnôt zrážok a teploty vzduchu s nezmenenou variabilitou (smerodajná odchýlka (S_d) pri teplote vzduchu (T) a variačný koeficient (C_v) pri zrážkových úhrnoch (R)) do roku 2050 v porovnaní s obdobím 1901-1990. Príklady modifikácie časových radov denných priemerov teploty vzduchu (T), relatívnej vlhkosti vzduchu (U) a sýtošného doplnku (D) sú uvedené na obr. 9 pre scenáre CCCM 2000 a GISS 1998. Tu sme použili ako referenčný rad denné hodnoty z pomerne extrémneho roku 1992 namerané v Hurbanove (obr. 8, Lapin et al., 2003d) a ako scenáre nechladené mesačné hodnoty podľa Lapin et al. (2001a), pričom scenáre mernej vlhkosti vzduchu sme použili pre tlak vodnej pary. Z obr. 8, 9 a 10 vidíme, že aj v prípade malého rastu U v teplom polroku D dosť výrazne rastie, čo znamená rast potenciálnej evapotranspirácie (vplyv exponenciálneho rastu tlaku vodnej pary s teplotou vzduchu je tu dominantný).



Obr. 8. Denné priemery teploty vzduchu T , relatívnej vlhkosti vzduchu U (tu $0,25 \cdot U$) a štatisticky generovaných denných súm potenciálnej evapotranspirácie E_o (z vypočítaných mesačných súm E_o) v Hurbanove v roku 1992 (podrobnosti výpočtu E_o po dňoch sú v Lapin et al, 2003d).



Obr. 9. Denné priemery relatívnej vlhkosti vzduchu (U_0) v referenčnom roku 1992 a scenáre denných hodnôt dU , teploty vzduchu (T) a sýstostného doplnku dD pre časový horizont roku 2075 podľa modelov CCCM 2000 (vľavo) a GISS 1998 úpravou denných údajov z referenčného roku 1992; kvôli lepšiemu prehľadu sú uvedené hodnoty $U/10$ a $-4 \cdot dD$; (hodnoty T_0 sú na obr. 8).



Obr. 10. Denné priemery sýstostného doplnku D [hPa] v referenčnom roku 1992 (modrá farba) a v modelovom roku 2075 (červená farba) podľa scenárov CCCM 2000 (Lapin et al., 2003d).

ZÁVER

V príspevku sme sa venovali závažnej problematike – návrhu scenárov extrémnych zrážkových epizód. Vzhľadom na to, že takéto scenáre nie sú priamo v ponuke výstupov GCMs, je potrebné použiť náhradné analytické výpočty, niekedy aj expertný odhad. Uvedený je tu väčšinou iba prehľad publikovaných podkladov, čiastočne sme sem zaradili aj doteraz nepublikované výsledky. Dospeli sme k nasledujúcim záverom:

1) Za určitých okolností môže v budúcnosti dôjsť k zvýšeniu úhrnov zrážok počas mimoriadnych zrážkových epizód až o 50% v porovnaní s historickými maximami (pod uvedenými okolnosťami rozumieme rast teploty vzduchu o 3,5 °C a mernej vlhkosti vzduchu o 25% počas takýchto situácií v letných mesiacoch v porovnaní s historickými extrémami). Modelové výpočty odtoku v skúmaných povodiach potvrdili, že takéto extrémne zrážkové situácie môžu zapríčiniť koncom 21. storočia zvýšenie doterajších maximálnych

prietokov počas privalových povodní v teplom polroku aj o viac ako 100% (Lapin et al., 2003a,b).

2) Epizódy viacerých dní s nízkymi úhrnmi zrážok vo vegetačnom období roka, spojené väčšinou s teplým a málooblačným počasím s nízkou relatívnou vlhkosťou vzduchu môžu nadobudnúť tiež katastrofálny rozmer v najbližších desaťročiach. Oteplenie o 3,5 °C môže aj pri málo zmenenej relatívnej vlhkosti vzduchu znamenať značné zvýšenie sýtostného doplnku (o 2 až 4 hPa). To sa prejaví počas takýchto období v zvýšenej potenciálnej evapotranspirácii aj o vyše 20% s veľmi nepriaznivými dôsledkami na ekosystémy a v socio-ekonomickej sfére (Lapin et al., 2003d).

V najbližšej budúcnosti je potrebné venovať zvýšenú pozornosť regionálnej interpretácii výstupov nových modelov GCMs, najmä tých, ktoré majú prijateľné hodnoty modelovanej vlhkosti vzduchu. To umožní aj spresnenie odhadov a výpočtov prezentovaných v tomto príspevku.

Pod'akovanie: Výsledky projektov VEGA č. 1/8255/01 (Grantová agentúra SR) a APVT-51-006502 (ÚH SAV) ako aj údaje SHMÚ boli využité v tomto príspevku. Autori ďakujú za podporu výskumu a za poskytnutie podkladov.

LITERATÚRA

- Dai, A., Wigley, T.M.L., Boville, B.A., Kiehl, J.T., Buja, L.E. (2001):** Climates of the Twentieth and Twenty-First Centuries Simulated by the NCAR Climate System Model. *J. Climate*, 14, 4, 485-519.
- Gaál, L., Lapin, M. (2002):** Extreme several day precipitation totals at the Hurbanovo observatory (Slovakia) during the 20th century. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, Vol. 32, No. 3, 197-213.
- Faško, P., Lapin, M., Sekáčová, Z., Šťastný, P. (2003):** Extraordinary climatic anomaly in 2003. *Meteorologický časopis*, Vol. VI, No. 3, 3-7.
- Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J., Čunderlík, J. (2000):** Modelovanie vplyvu zmeny klímy na režim odtoku v regióne stredného Slovenska. In: NKP SR, 9, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 15-38.
- Hrvol', J., Lapin, M., Tomlain, J. (2001):** Changes and variability in solar radiation and evapotranspiration in Slovakia in 1951-2000. *Acta Meteorol. Univ. Comen.*, XXX, 31-58.
- IPCC (2001):** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge Univ. Press, UK, 944 pp.
- Kostka, Z., Holko, L. (2000):** Vplyv klimatickej zmeny na priebeh odtoku v malom horskom povodí. In: Scenáre klimatickej zmeny a impakty. Zväzok č. 8 Národného klimatického programu SR. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 91-109.

- Lapin, M., Nieplová, E., Faško, P. (1995):** Regionálne scenáre zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku. In: NKP SR, 3, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 17-57.
- Lapin, M., Faško, P. (1998):** Denné úhrny zrážok v Hurbanove v období 1871 - 1995. Bulletin SMS pri SAV, IX, č.1, Bratislava, 13 - 20.
- Lapin, M., Melo, M. (1999):** Climatic Changes and Climate Change Scenarios in Slovakia. Meteorologický časopis, 2, č. 4, SHMÚ, Bratislava, 5-15.
- Lapin, M., Melo, M., Damborská, I., Gera, M., Faško, P. (2000):** Nové scenáre klimatickej zmeny pre Slovensko na báze výstupov prepojených modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry. In.: Národný klimatický program SR, 8, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 5-34.
- Lapin, M., Damborská, I., Melo, M. (2001a):** Scenáre súborov viacerých vzájomne fyzikálne konzistentných klimatických prvkov. In.: NKP SR, 11, SHMÚ a MŽP SR, Bratislava, 5-30.
- Lapin, M., Damborská, I., Melo, M. (2001b):** Downscaling of GCM outputs for precipitation time series in Slovakia. Meteorol. čas., IV, No. 3, 29-40.
- Lapin, M., Melo, M., Damborská, I., Gera, M., Gaál, L., Faško, P., Šťastný, P. (2002):** Príprava scenárov klimatických zmien. Záverečná správa časti úlohy 03 z etapy 02.05 „Výskum zrážkovo-odtokových vzťahov“. Projekt VTP 27-34 „Výskum antropogénnych faktorov na vodné systémy“. Katedra meteorológie a klimatológie FMFI UK a SHMÚ pre Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava.
- Lapin, M., Hlavčová, K. (2003a):** Changes in Summer Type of Flash Floods in the Slovak Carpathians due to Changing Climate. Proceedings of the International Conference on Alpine Meteorology and MAP2003 Meeting, Brig, Switzerland, 19.-23.V.2003, Publ. of MeteoSwiss, No. 66, 105-108.
- Lapin, M., Hlavčová, K., Petrovič, P. (2003b):** Vplyv klimatickej zmeny na hydrologické procesy. Acta Hydrologica Slovaca, Vol. IV, No. 2, 211-221.
- Lapin, M., Damborská, I., Gaál, L., Melo, M. (2003c):** Possible Precipitation Regime Change in Slovakia due to Air Pressure and Circulation Changes in the Euro-Atlantic Area until 2100, Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 33, No. 3, 161-190.
- Lapin, M., Melo, M. (2003d):** Možnosti konštrukcie scenárov denných hodnôt a extrémov klimatických prvkov z výstupov najnovších modelov GCMs. In.: Funkcia energetickej a vodnej bilancie v bioklimatických systémoch, Račková dolina, 2.-4. IX. 2003, CD ISBN 80-8069-244-0.
- Majerčáková, O., Šedík, P. (1997):** Hydrologické scenáre možných zmien odtokov počas roka na slovenských tokoch. In: NKP SR, 6, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 125-140.
- Majerčáková, O., Takáčová, D. (2001):** Možné dôsledky klimatických zmien na hladinový režim podzemných vôd v alúviách. In: Nové scenáre klimatických prvkov a ich využitie. Zväzok č. 11 Národného klimatického programu SR. MŽP SR a SHMÚ, 31-49.
- Marečková, K., Lapin, M., Minárik, B., Mojík, I., Zavadský, I., Závodský, D., Zuzula, I. (1997):** (D. Závodský: Ed.) Územná štúdia Slovenska, Záverečná správa, U.S. Country Studies Program, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 108 s.
- Melo, M. (1996):** Klimatické scenáre. In: NKP SR, 4, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 5-21.
- Melo, M. (2003):** Klimatické modely a ich využitie pre odhad klimatických zmien na území Slovenska. Kandidátska dizertačná práca. FMFI UK, Bratislava, 155 s.
- Mind'áš, J., Škvarenina, (eds.), (2003):** Lesy Slovenska a globálne klimatické zmeny. EFRA Zvolen, LVÚ Zvolen, 129 s.
- Mind'áš, J., Lapin, M., Škvarenina, J. (eds.), (1996):** Klimatické zmeny a lesy Slovenska. In.: NKP SR, 5, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 96 s.
- Pekárová, P., Halmová, D., Miklánek, P. (1996):** Simulácia režimu odtoku za zmenených klimatických podmienok v povodí Ondavy. J. Hydrol. Hydromech., 44, 1996, 5, 291-311.
- Pekárová, P. (2000):** Zákonitosti kolísania priemerných ročných prietokov. NKP SR, 9, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 39 - 57.
- Petrovič, P. (2000):** Dôsledky premenlivosti klímy na hydrologický režim v povodí Nitry. In: Možné dôsledky klimatickej zmeny na Slovensku. Zväzok č. 9 Národného klimatického programu SR. SHMÚ, MŽP SR, Bratislava, 58-73.
- Petrovič, P. (2002):** Záverečná správa z etapy 02.05 „Výskum zrážkovo-odtokových vzťahov“. Projekt VTP 27-34 „Výskum antropogénnych faktorov na vodné systémy“. Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava.

- Szolgay, J., Hlavčová, K., Parajka, J., Čunderlík, J. (1997):** Vplyv klimatickej zmeny na odtokový režim na Slovensku. In: NKP SR, 6, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 11-110.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Kohnová, S., Kubeš, R., Zvolenský, M., Lapin, M., Šťastný, P., Faško, P., Gaál, L. (2002):** Analýza povodňového režimu horného Hrona. ZS VTP 27-34 Výskum vplyvu antropogénnych faktorov na vodné systémy, časť E 04.01. VÚVH, Bratislava.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Lapin, M., Danihlík, R. (2003):** Impact of climate change on mean monthly of runoff in Slovakia. Meteorologický časopis, Vol. VI, No. 3, 2003, 9-21.
- Škvarenina, J., Mind'áš, J., Čaboun, V. (eds.), (1996):** Lesné ekosystémy a globálne klimatické zmeny. LVÚ, Zvolen, 182 s.
- Špánik, F., Šiška, B., Tomlain, J., Repa, Š, Antal, J., Igaz, D. (1999):** Dopady klimatických zmien na poľnohospodárstvo Slovenska. Súhrnná správa GÚ 1/4415/97, SPÚ, Nitra, 1-42.
- Špánik, F., Šiška, B. (2000):** Energetická a vlhová zabezpečenosť vegetačného leta v podmienkach klimatickej zmeny. In.: NKP SR, 9, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 98-106.
- Takáč, J. (2002):** Dôsledky zmeny klímy na bilanciu vody v poľnohospodárskej krajine. In.: NKP SR, 10, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 16-26.
- Tomlain, J. (1999):** Expected climate change impacts on changes of potential and actual evapotranspiration on the territory of Slovakia. Acta Meteorol. Univ. Comen., XXVIII, 21-26.
- WMO, 1969.** Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation, WMO No. 237, TP. 129.
- Zikmunda, O. (1966):** Jednoduchý model pro předpověď srážek. Meteorol. zprávy, 19, 91-93.
- Zverev, A.S., (1986):** Synoptická meteorológia. Alfa, Bratislava, SNTL, Praha, 712 s. (preklad z ruštiny)

ABSTRAKT

V príspevku je prezentovaný prehľad výsledkov prípravy scenárov veľmi vysokých 1- až 5-denných úhrnov zrážok pre časové horizonty rokov 2010, 2030 a 2075, teda mimoriadnych zrážkových situácií potenciálne zapríčiňujúcich povodne. Stručne je tu uvedený aj postup prípravy scenárov mimoriadnych suchých období. Za základ sa brali regionálne modifikované výstupy modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry CCCM 1997 a CCCM 2000 (Kanada) a GISS 1998 (USA). Okrem toho sa ako referenčné súbory použili pozorované mimoriadne zrážkové situácie z obdobia 1951-2001 v povodiach Kysuce a horného Hrona. Ako referenčný mimoriadne suchý a teplý rok sa použil rok 1992.