

# REGIONÁLNA MODIFIKÁCIA VÝSTUPOV GCMs PRE SLOVENSKO A INÉ METÓDY PRÍPRAVY SCENÁROV KLIMATICKEJ ZMENY – SÚVISIACE UŽÍVATEĽSKÉ PROBLÉMY

## REGIONAL MODIFICATION OF GCMs OUTPUTS FOR SLOVAKIA AND OTHER METHODS OF CLIMATE CHANGE SCENARIOS DESIGN – CONNECTED USER PROBLEMS

Lapin, Milan, Oddelenie meteorológie a klimatológie, KAFZM, FMFI UK Bratislava

**ABSTRACT:** Short review of General Circulation Models (GCMs) and Regional Circulation Models (RCMs) with availability of monthly and daily outputs is presented (more in Melo, 1996, 2003). There are 4 basic methods of regional climate change scenarios design: 1<sup>st</sup> – Incremental (the simplest), 2<sup>nd</sup> – Analogue (historical or paleoclimatic), 3<sup>rd</sup> – Weather generator (artificial or based on real climatic statistics), 4<sup>th</sup> – GCMs (General Circulation Models) based. The additional one can be considered as combined method, usually based on GCMs (mean annual/monthly warming and mean annual/monthly change in precipitation totals) and on historical analogue (statistical structure of daily/monthly data series, including physical plausibility among phenomena). In sense of some simplification the weather generator can be considered also as a combined method of climate change scenarios design. Finally some results of different climate change scenarios for Hurbanovo and possible user problems are listed and discussed. Scenarios of exceptional weather events are also demanded by users, mainly from the Hydrology, Agriculture and Forestry sectors.

**Key words:** climate change, statistical downscaling, user demands

### ÚVOD

Už takmer 15 rokov poskytujeme verejnosti informácie o možných zmenách klímy na území Slovenska. Keďže sú scenáre zmeny klímy (alebo zmien klímy) v niektorých prípadoch vzájomne odlišné, verejnosť má často pochybnosti o ich spoľahlivosti. V tomto príspevku sa pokúsime poskytnúť čo najkomplexnejšiu informáciu o elementárnych metódach prípravy klimatických scenárov a o súvisiacich užívateľských problémoch s ich aplikáciou v praxi. Už v úvode musíme zdôrazniť najdôležitejšiu vlastnosť klimatických scenárov, ktorá vyplýva z štatistickej a fyzikálnej povahy dlhých časových radov klimatických prvkov – neurčitosť s rastúcim časovým odstupom a alternatívnosť. Z definície klímy (alebo klimatických pomerov) akéhokoľvek miesta vyplýva, že máme na mysli nejakú syntézu údajov a informácií charakterizujúcich dlhodobý režim počasia, pričom sa táto syntéza opiera o zložitú analýzu všetkých podkladov, jednak z pohľadu spoľahlivosti a tiež z možností fyzikálnej interpretácie zistených štatistických vzťahov (Lapin a Tomlain, 2001).

Pod pojmom neurčitost' s rastúcim časovým odstupom tu nerozumieme len známu skutočnosť, že čím sú nejaké procesy od nás viac časovo vzdialené, tým je aj väčšia možnosť, že sa budú vyvíjať pre nás neočakávanou cestou, čo vyplýva priamo z povahy čiastočne stochastických a čiastočne deterministických systémov. Podľa E. Lorenza (1967) je potrebné klimatický systém považovať za pseudotranzitivný, čiže nemáme žiadnu nádej, že ho budeme vedieť niekedy v budúcnosti úplne opísať matematicko-fyzikálnym aparátom tak, aby sme mohli so 100% pravdepodobnosťou predvídať jeho vývoj do vzdialenej budúcnosti. Do určitej miery sa však predpovedať dá. Okrem tejto povahy klimatického systému (skladajúceho sa z 5 subsystémov – atmosféra, hydrosféra, kryosféra, litosféra a biosféra) do klimatotvorných faktorov (astronomických, cirkulačných a geografických) vstúpil svojim nepredvídateľným správaním človek, teda vniesol tam antropogénny klimatotvorný faktor, a tak začal čoraz viac modifikovať klimatotvorné procesy na Zemi (IPCC, 2001, Lapin a Tomlain, 2001).

Tretia správa IPCC (2001) a aj iné dokumenty a špeciálne správy IPCC (SRES, 2000) nabádajú riešiteľov a „tvorcov“ klimatických scenárov, aby sa pokúšali pripravovať scenáre klimatickej zmeny zohľadňujúce neurčitosti vývoja skleníkového efektu atmosféry a tiež elementárne vlastnosti štatistickej štruktúry časových radov klimatických prvkov aspoň v dvoch alternatívach. Prvou alternatívou by mohol byť dolný odhad najpravdepodobnejšieho rastu koncentrácie CO<sub>2</sub> (napr. o 0,5% ročne) a horný odhad rastu koncentrácie aerosólov v atmosfére, druhou opačný prípad, teda vyšší rast koncentrácie CO<sub>2</sub> (napr. o 1% ročne) a malý rast/pokles koncentrácie aerosólov. Inou kvalitou alternatívnosti je používanie rozdielnych globálnych (GCMs) a regionálnych (RCMs) modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry, prípadne aj rozdielne metódy prípravy scenárov. Podrobnosti uvedieme ďalej v texte.

## **POŽIADAVKY PRAXE NA KLIMATICKÉ SCENÁRE**

Je vcelku známou skutočnosťou, že užívatelia klimatických údajov a tiež klimatických scenárov na budúce desaťročia by uvítali podklady v tvare časových radov ako pokračovanie radov klimatologických pozorovaní, teda v rovnakom tvare a formáte. Ide najmä o časové rady denných a mesačných údajov na desaťročia dopredu, prípadne aj o podrobnejšie údajové súbory z epizód zaujímavého počasia (napríklad hodinové časové rady z niekoľkodenných epizód počasia zapríčiňujúce povodne alebo sucho). Je síce pravda, že najväčší záujem je o priemery teploty vzduchu a o úhrny atmosférických zrážok (ďalej len zrážok), no už po niekoľkomesačných experimentoch sa užívatelia natolko oboznámia s problematikou, že požadujú aj scenáre ďalších prvkov, najmä priemerov vlhkosti vzduchu, súm globálneho žiarenia a úhrnov výparu. Nezriedka je záujem aj o doplnujúce klimatické prvky (počet dní so zrážkami, počet dní so snehovou pokrývkou, sumy výšok snehovej pokrývky, maximá a minimá teploty vzduchu...). Občas sa stáva, že užívatelia prejavia záujem o komplex klimatických údajov pre tzv. normálny, teplý, studený, vlhký a suchý rok. Je zrejmé, že najprv vznikne diskusia na tému: ako definovať normálny, teplý, studený, vlhký a suchý rok. V niektorých prípadoch je diskusia o tvare a formáte klimatických scenárov s užívateľmi zdĺhavá a je potrebné, aby sa zostavovatelia scenárov oboznámili aj s metódami ich využívania v praxi, vrátane užívateľských modelov (IPCC, 2001).

Všetky druhy klimatických scenárov môžeme všeobecne rozdeliť do dvoch skupín, pričom za klimatickú zmenu (zmenu klímy) považujeme len tú časť všetkých klimatických zmien, ktorá je vyvolaná jednoznačne antropogénne podmieneným rastom skleníkového efektu atmosféry:

- A) Scenáre klimatickej zmeny** – hodnoty rozdielov alebo kvocientov medzi dlhodobými charakteristikami klímy v modelových obdobiach v budúcnosti a pozorovanou klímou v referenčných obdobiach v minulosti. Za štandardné obdobie na výpočet referenčnej klímy sa na Slovensku používa obdobie 1951-1980, teda 30-ročné rady ktoré sa vyznačuje takmer nulovým trendom a tiež charakteristikami klímy blízky dlhšiemu obdobiu 1901-1990, ktoré asi nebolo príliš ovplyvnené nastupujúcou klimatickou zmenou. Za štandardné modelové obdobia sa na Slovensku považujú 30- alebo 50-ročné obdobia so stredom v rokoch 2010, 2030 a 2075, teda 1996-2025 atď. (niekedy sa nazývajú aj časovými horizontmi, IPCC, 2001, Lapin et al., 1997).
- B) Scenáre klimatických zmien** – časové rady klimatických prvkov charakterizujúce budúcu klímu. Predpokladáme pritom, že tieto časové rady zahŕňajú aj prirodzené zmeny klímy a aj zmenu klímy vplyvom rastúceho skleníkového efektu atmosféry. Časové rady scenárov modelovej klímy v období 2001-2100 plynulo nadväzujú na časové rady pozorovanej klímy v období 1901-2000. Časové rady modelovej klímy (2001-2100) nie je možné považovať za prognózu na jednotlivé roky – sú to iba scenáre charakterizujúce časový priebeh, variabilitu, extrémny a distribučné krivky modelových klimatologických údajov v nejakých 30- až 50-ročných obdobiach (IPCC, 2001).

## MOŽNOSTI A METÓDY PRÍPRAVY KLIMATICKÝCH SCENÁROV

Ďalšie rozdelenie poskytovaných klimatických scenárov môžeme urobiť predovšetkým podľa metodických princípov prípravy. Tak môžeme vyčleniť: 1) Scenáre vypracované na základe modelovej simulácie všeobecnej cirkulácie atmosféry za zmenených podmienok chemického a aerosólového zloženia atmosféry (spomínané GCMs a RCMs, Melo, 2003), pričom tu hrá dôležitú úlohu najmä komplexnosť modelovaných fyzikálnych procesov; 2) Scenáre pripravené ako analógy z minulých relatívne teplých období (podľa prístrojových meraní – u nás od roku 1775 (Viedeň), alebo podľa podkladov z dávnejších období – napr. klimatické optimum pred 5 – 8 tis. rokmi (podľa tzv. proxy údajov), ktoré bolo oproti súčasnosti asi o 2 °C teplejšie a trochu vlhšie, Lapin et al., 1995, Melo, 2003 a i.); 3) Scenáre pripravené stochastickým generátorom počasia – modelované časové rady údajom môžu mať vopred zvolené odchýlky oproti štandardným referenčným obdobiom, pričom je možné zvoliť zmenu priemeru, distribučnej krivky, extrémov, variability, cyklov a iných parametrov – určité problémy vznikajú kvôli zaručeniu fyzikálnej konzistentnosti vzťahov medzi prvkami, pretože sa modelovo rieši predovšetkým vzťah štatistický (Dubrovský, 1996, 1997); 4) Scenáre pripravené ako inkrementálne sekvencie postupných odchýlok – tieto scenáre zásadne nemajú elementárnu fyzikálnu a štatistickú konzistentnosť a v súčasnosti sa už používajú iba na testovanie impaktných modelov (IPCC, 2001, Lapin et al., 2001); 5) Scenáre ako kombinácia viacerých prístupov (Lapin et al., 1995).

Venujme teraz pozornosť metodike spracovania jednotlivých druhov klimatických scenárov a tiež ich užívateľskému formátu. Začnime scenármi na báze GCMs (RCMs) a postupne prejdeme na ďalšie menované možnosti, pričom sa pokúsime uviesť aj príklady pre Hurbanovo.

**1) Scenáre na báze GCMs:** Spoločným znakom GCMs je skutočnosť, že výstupy modelov sú v tvare časových radov pre uzlové body (grid points) v štvorcovej sieti okolo 300x300 km pre GCMs. Takejto štvorcovej sieti zodpovedá aj vstupná orografia a aj fyzikálny mechanizmus všetkých obsiahnutých procesov. Môže sa teda stať, že v modeli sa neberie ohľad na menšie pohoria a menšie kotliny, pričom takmer všetky doliny a všetky jednotlivé horské hrebene sú dokonale zhladené (neexistujú). Keďže v modeloch sú zahrnuté aj také procesy ako náveterné a záveterné efekty, koeficient odtoku a p., je zrejmé, že vo viacerých prípadoch dostávame nereálne výsledky. Úhrny zrážok sú podstatne vyššie ako zodpovedá skutočnosti a na miernych svahoch generalizovanej orografie je veľmi pomalý odtok a teda aj pomerne veľký výpar (blížiaci sa k výparu potenciálnemu). To sekundárne spôsobuje vyššiu relatívnu vlhkosť vzduchu oproti očakávanej skutočnosti, čo sa v modelových výstupoch objaví ako vyššia merná vlhkosť vzduchu v porovnaní s meranými hodnotami. S výstupmi modelov RCMs nemáme doteraz na Slovensku skúsenosti, rozlíšenie je pri nich väčšinou od 30x30 km (vzdialenosť uzlových bodov) a doteraz majú ešte horšiu zhodu s meraniami ako GCMs. Spoločným znakom výstupov GCMs ako aj RCMs je to, že reprezentujú akýsi územný priemer okolo uzlového bodu, čo sa prejavuje najmä v menšej časovej variabilite a značne zmenšená je aj priestorová variabilita údajov.

**Downscaling** (regionálna modifikácia) výstupov GCMs sa robí v niekoľkých samostatných krokoch.

a) Najprv sa vyberú vhodné modely podľa niekoľkých kritérií – použijú sa aspoň dva alternatívne scenáre SRES pre koncentráciu CO<sub>2</sub> a aerosólov, prípadne aj ich prijateľná fyzikálna a štatistická verzia (napr. prepojený atmosféricko-oceánický model, začiatok pred rokom 1950, postupný rast koncentrácie CO<sub>2</sub> a aerosólov, citlivosť modelu na rast koncentrácie CO<sub>2</sub> a aerosólov a i.).

b) Výstupy GCMs sa testujú podľa najbližších uzlových bodov (aspoň 4 v okolí Slovenska) v období s kontrolnou klímou (najlepšie 1901-1990, prípadne iba 1951-1980), pričom sa testuje tesnosť zhody priemerov, ročného chodu a variability s empiricky získanými časovými radmi z blízkej stanice (pokiaľ je to možné v podobnej nadmorskej výške). Testovať by sa mala predovšetkým teplota vzduchu, úhrny zrážok, merná vlhkosť vzduchu a globálne žiarenie.

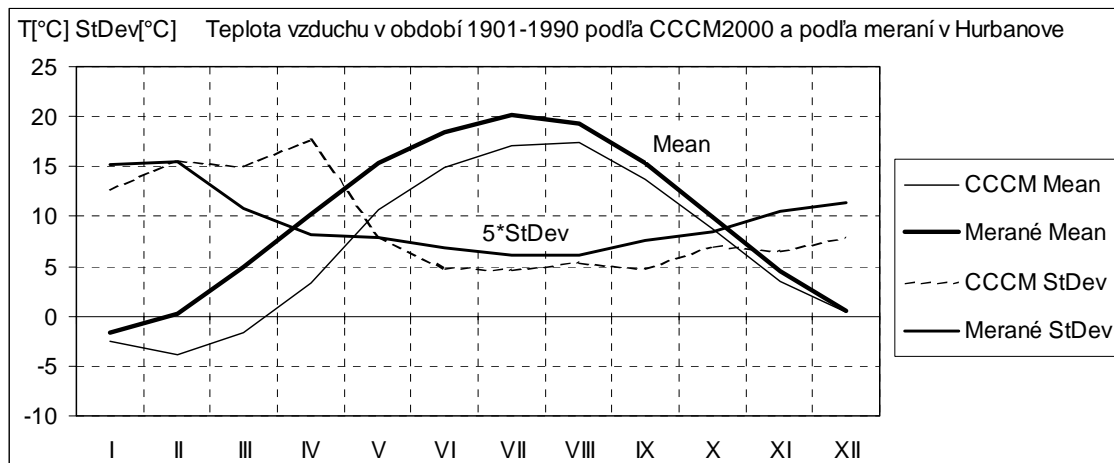
c) Z viacerých testovaných modelov sa vyberú najmenej dva s najlepšou zhodou charakteristík v kontrolnom (referenčnom) období v absolútnom a relatívnom hodnotení (najmenšie odchýlky mesačných charakteristík a najlepšie vyjadrený ročný chod, pričom sa berie do úvahy aj rozdielna nadmorská výška testovaných uzlových bodov a pozorovacích staníc);

d) V ďalšom kroku začína vlastný štatistický downscaling – zistíme si najprv, že či existujú medzi výstupmi v okolitých uzlových bodoch také zásadné rozdiely, ktoré znemožňujú robiť lineárnu interpoláciu do hociktorého bodu na Slovensku, prípadne, že či je výsledkom takejto interpolácie iba nepatrný rozdiel medzi najodľahlejšími bodmi na Slovensku.

e) V prípade veľkej podobnosti výstupov v okolitých 4 uzlových bodoch sú rozdiely interpolovaných hodnôt veľmi malé (pri mesačných priemeroch teploty vzduchu (T) zvyčajne menšie ako 0,2 °C v 30-ročnom priemere), preto môžeme urobiť interpoláciu iba do stredu Slovenska, pričom interpolačnými váhami sú prevrátené hodnoty vzdialenosti uzlových bodov od stredu Slovenska.

f) Ak sú interpolované hodnoty územne diferencované, prípadne ak jednotlivé uzlové body reprezentujú veľmi rozdielne klimatické podmienky (napr. pri zrážkach náveterné a zúveterné podmienky, stredomorský a vnútrozemský režim a p.), je lepšie rozhodnúť sa pre interpoláciu do každého požadovaného bodu na Slovensku zvlášť.

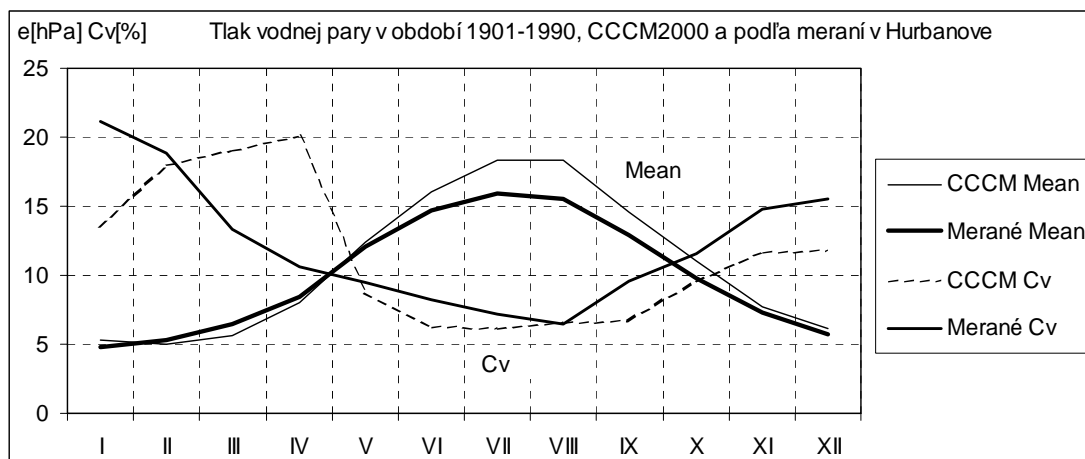
g) Územne diferencovaná interpolácia sa dá robiť dvomi metódami: 1) Lineárne – váhou je prevrátená vzdialenosť uzlových bodov od daného bodu na Slovensku; 2) Váženou interpoláciou – váhou je tesnosť vyjadrenia reálneho režimu daného prvku v požadovanom bode na Slovensku v jednotlivých uzlových bodoch (pri zrážkach sa napríklad zistilo, že výstupy z niektorého uzlového bodu najlepšie vyjadrujú ročný chod na určitých stanicích na Slovensku, napr. náveterných, južne orientovaných...).



**Obr. 1. Mesačné priemery meranej a modelovanej (podľa modelu CCCM2000) teploty vzduchu (T) v Hurbanove v období 1901-1990 (StDev je 5x zväčšená smerodajná odchýlka mesačných priemerov T; CCCM2000 predstavuje interpolované hodnoty zo 4 uzlových bodov pre nadmorskú výšku 561 m, Hurbanovo má 115 m n.m.).**

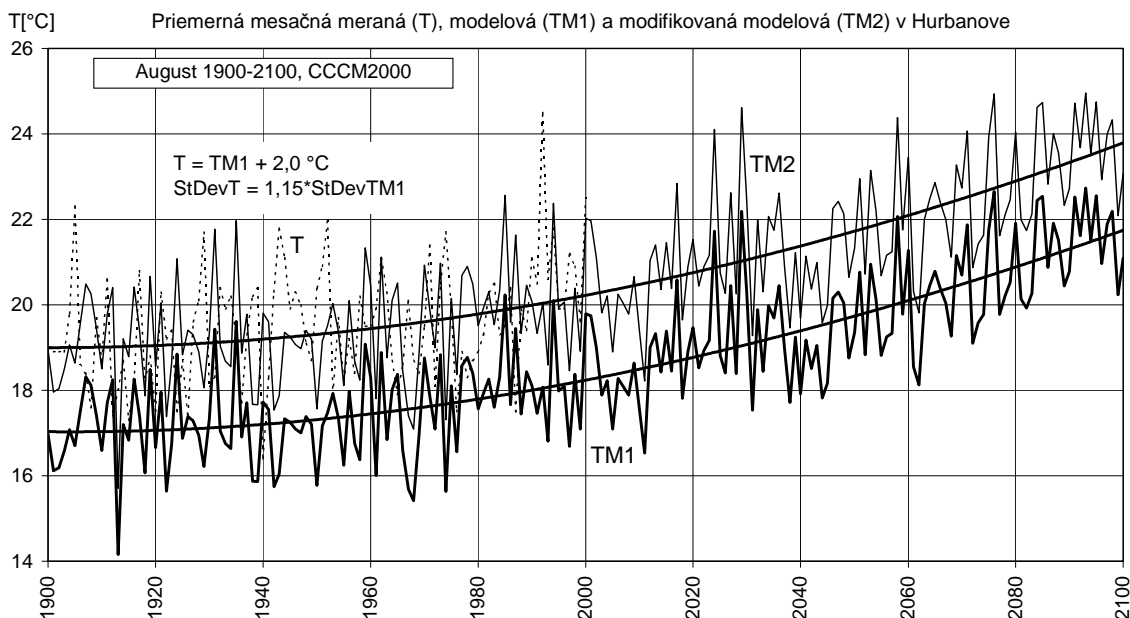
h) Výsledkom downscalingu podľa a) až g) sú časové rady mesačných alebo denných hodnôt za obdobie rokov  $X_0$  až  $X_N$ , kde zvyčajne  $X_0 = 1900$  a  $X_N = 2100$  (označme ako M1), obdobie  $X_K$  až  $X_L$ , kde  $X_L < 1991$  a  $X_L - X_K \geq 30$ , je tzv. kontrolný výstup a  $X_M$  až  $X_N$ , kde  $X_M \geq 2001$ , modelové obdobie.

i) V ďalšom kroku sa robí porovnanie priemerov a variability časového radu  $X_K$  až  $X_L$  s rovnakým časovým radom meraných údajov na požadovanej stanici. Zistí sa rozdiel (kvocient) dlhodobých priemerov a rozdiel (kvocient) smerodajnej odchýlky (variačného koeficientu). Rozdiely a smerodajné odchýlky sa používajú iba pri teplote vzduchu, obr. 1, pri úhrnoch zrážok a zľava nulou limitovaných súboroch s ľavou asymetriou sa používajú iba kvocienty a variačné koeficienty, pri iných zľava limitovaných súboroch (merná vlhkosť vzduchu, tlak vodnej pary, globálne žiarenie...) sa uprednostňujú kvocienty a variačné koeficienty pred odchýlkami, obr. 2.

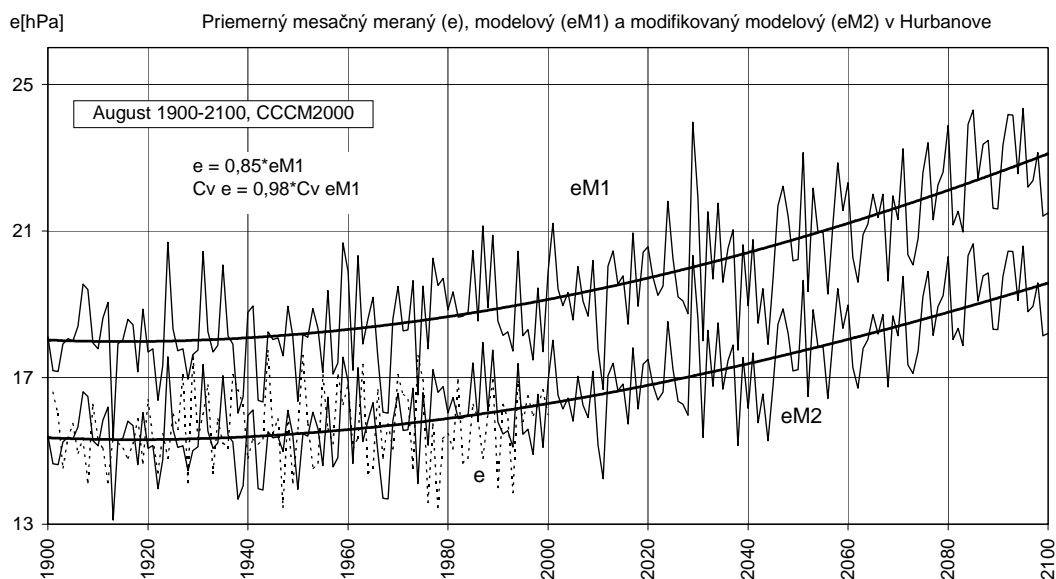


**Obr. 2.** Mesačné priemery meraného a modelovaného (podľa modelu CCCM2000) tlaku vodnej pary ( $e$ ) v Hurbanove v období 1901-1990 ( $e$  je vypočítaný z mernej vlhkosti vzduchu;  $Cv$  je variačný koeficient mesačných priemerov  $e$  v %; CCCM2000 predstavuje interpolované hodnoty zo 4 uzlových bodov pre nadmorskú výšku 561 m, Hurbanovo má 115 m n.m.).

j) Potom sa aplikujú zistené rozdiely dlhodobých priemerov a variability v kontrolnom časovom rade  $X_K$  až  $X_L$  na celý súbor interpolovaného modelového výstupu  $X_O$  až  $X_N$ , čím vznikne nový časový rad  $X_{M2}$  až  $X_{N2}$ , čo je lepšie vidieť z obr. 3 a 4 (označme ako M2). Predpokladáme pritom že zistené rozdiely (kvocienty) sa zachovávajú v celom súbore výstupu, zmeny variability a trend v modifikovanom časovom rade  $X_{M2}$  až  $X_{N2}$  sú tak primárne určené trendom a variabilitou v časovom rade  $X_M$  až  $X_N$ .



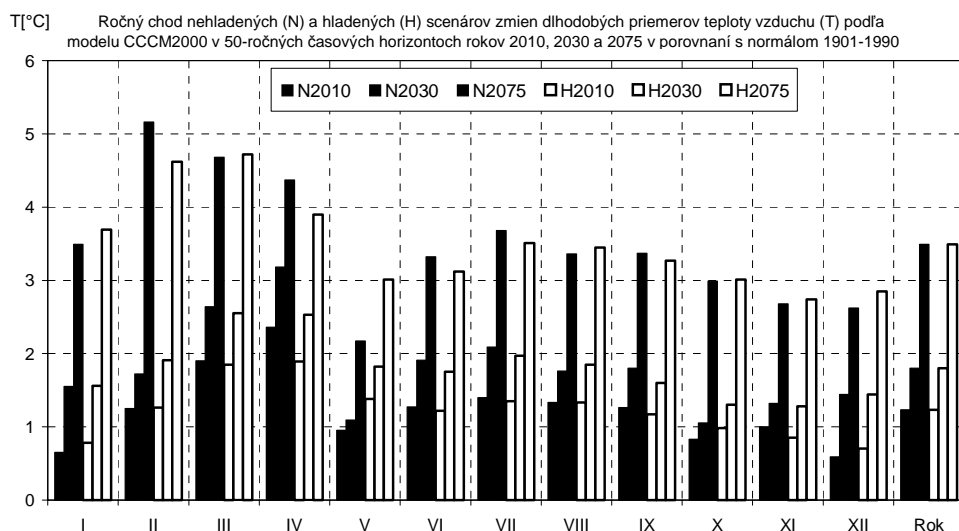
**Obr. 3.** Časový priebeh mesačných priemerov teploty vzduchu pre august v Hurbanove v období 1900-2100 (T - merané hodnoty v období 1901-2000; TM1 – výstup modelu CCCM2000 interpolovaný do stredu Slovenska; TM2 – modifikované hodnoty TM1 podľa T (priemer a variabilita) pre Hurbanovo v období 1900-2100; T je v období 1901-1990 o 2 °C vyššia a má 1,15x vyššiu smerodajnú odchýlku (StDev) ako TM1; TM2 má v období 1901-1990 rovnaký priemer a rovnakú StDev ako T; TM1 je pre nadmorskú výšku 561 m).



**Obr. 4. Časový priebeh mesačných priemerov tlaku vodnej pary pre august v Hurbanove v období 1900-2100 (e - merané hodnoty v období 1901-2000; eM1 – prepočítaný výstup modelu CCCM2000 interpolovaný do stredu Slovenska; eM2 – modifikované hodnoty TM1 podľa e (priemer a variabilita) pre Hurbanovo v období 1900-2100; e je v období 1901-1990 o 15% nižší a má o 2% menší variačný koeficient (Cv) ako eM1; eM2 má v období 1901-1990 rovnaký priemer a rovnaký Cv ako e; dôvody pomerne vysokých hodnôt eM1 sú vysvetlené v texte).**

k) Výsledné časové rady majú pre jednotlivé stanice na Slovensku takmer paralelný časový priebeh, čo je ovplyvnené predovšetkým zhladením získaným zo siete okolitých 4 uzlových bodoch (korelačný koeficient ( $r$ ) časových radov takýchto údajov medzi akýmikoľvek stanicami na Slovensku je vyšší ako 0,9). Ak potrebujeme získať časové rady s podobnou priestorovou variabilitou akú majú experimentálne časové rady v referenčnom období musíme urobiť dodatkovú modifikáciu, napr. podľa Lapina et al. (2001). Výsledky 3. modifikácie ( $X_{M3}$  až  $X_{N3}$ , označme M3; korelačné koeficienty  $r$  časových radov M3 medzi jednotlivými stanicami sú veľmi podobné hodnotám  $r$  medzi experimentálnymi radmi v referenčnom období, podrobnosti nájdeme v Lapin et al., 1999, 2001).

l) Pre viaceré aplikácie potrebujeme iba scenáre zmien dlhodobých priemerov v časových horizontoch 2010, 2030 a 2075 v porovnaní s referenčnou klímou v období 1951-1980. Takéto hodnoty je možné získať aj z časových radov  $X_{M2}$  až  $X_{N2}$ , resp.  $X_{M3}$  až  $X_{N3}$ , ak ich porovnáme s empirickými údajmi z obdobia 1951-1980. V rámci NKP SR sme použili zjednodušený postup a vylúčili sme z výpočtov scenárov klimatickej zmeny pre časové horizonty empirické údaje. Z výstupov GCMs sme vypočítali odchýlky (kvocienty) dlhodobých priemerov 50-ročných horizontov (1986-2035, 2006-2055, 2051-2100) od priemerov za obdobie 1901-1990 pre jednotlivé uzlové body a výsledné hodnoty sme potom interpolovali do stredu Slovenska (do jednotlivých staníc). Kvôli nerovnomernému ročnému chodu takýchto scenárov sme použili hľadanie váženým priemerom podľa vzťahu  $M_i = (M_{i-1} + 2 * M_i + M_{i+1}) / 4$ , kde  $M_i$  je hodnota v danom mesiaci,  $M_{i-1}$  a  $M_{i+1}$  v mesiaci predchádzajúcom a nasledujúcom, rovnako pre všetky prvky (obr. 5). Okrem štatistického existuje aj dynamický downscaling – napr. použitie regionálnych a lokálnych modelov vnorených do GCMs (IPCC, 2001 a i.).



**Obr. 5. Ročný chod nehladených (N) a hladených (H, podľa formuly  $M_i = (M_{i-1} + 2 \cdot M_i + M_{i+1})/4$ ) scenárov zmien dlhodobých priemerov teploty vzduchu (T) podľa výstupov modelu CCCM2000 interpolovaných do stredu Slovenska pre 50-ročné časové horizonty rokov 2010, 2030 a 2075 v porovnaní s normálom 1901-1990 (platí pre celé Slovensko).**

**2) Scenáre analógové:** Ako sme už uviedli predtým, je možné nájsť v minulosti také prípady režimu počasia, ktoré aspoň čiastočne zodpovedajú priebehu počasia v nejakých obdobiach počas očakávanej klimatickej zmeny. Najzložitejšie je rozhodovanie, že či zvolené historické obdobie predstavuje dostatočne reprezentatívny súbor na posudzovanie zmeneného dlhodobého režimu počasia. Najprv sa pokúsme charakterizovať hlavné znaky budúcej teplejšej klímy. Už dávnejšie boli publikované odhady o najpravdepodobnejšom možnom globálnom oteplení o 1,5 až 3,5 °C pri zdvojnásobení koncentrácie CO<sub>2</sub> v atmosfére, teda asi do roku 2075. Z éry prístrojových meraní nemáme k dispozícii žiadne také obdobie, ktoré by sa čo len trochu podobalo takému veľkému globálnemu otepleniu (od roku 1901 do roku 1945, alebo od roku 1975 – 2003, predstavovalo globálne oteplenie iba niekoľko desiatín °C (0,3 - 0,4 °C), čo je rozhodne málo a ešte nie je isté, že či v prvom prípade nešlo iba o prejav prirodzenej variability globálnej klímy Zeme). Druhé oteplenie (po roku 1975) už mnohí dávajú do súvisu s rastom skleníkového efektu atmosféry, preto by mohlo byť modelovým príkladom budúceho globálneho oteplenia zhruba päť až desaťnásobne väčšieho rozsahu (IPCC, 2001).

Môžeme sa orientovať aj na analýzu významnejších regionálnych oteplení od roku 1775. Žiaľ, iba na prelome 18. a 19. storočia sa objavilo v strednej Európe relatívne teplejšie počasie v trvaní asi 40 rokov, ale s veľkými individuálnymi odchýlkami od dlhodobého priemeru (Wien H-Warte). V období 1817-1828 bolo relatívne stabilnejšie teplé obdobie s celkovou odchýlkou od dlhodobého priemeru 1901-1990 až +0,5 °C (v zime iba +0,1 °C). Obdobie 1988-2003 malo na stanici Wien odchýlku až 1,4 °C (v zime +1,2 °C a v lete až +2,0 °C), no v Hurbanove iba 1,0 °C (v zime 1,1 °C a v lete 1,4 °C), tab. 1. Všetky ostatné teplejšie obdobia mali buď kratšie trvanie ako 5 rokov, alebo mali menšiu odchýlku ako 0,4 °C. Dôvodom výberu aspoň 5-ročného obdobia bola snaha orientovať sa na také prípa-

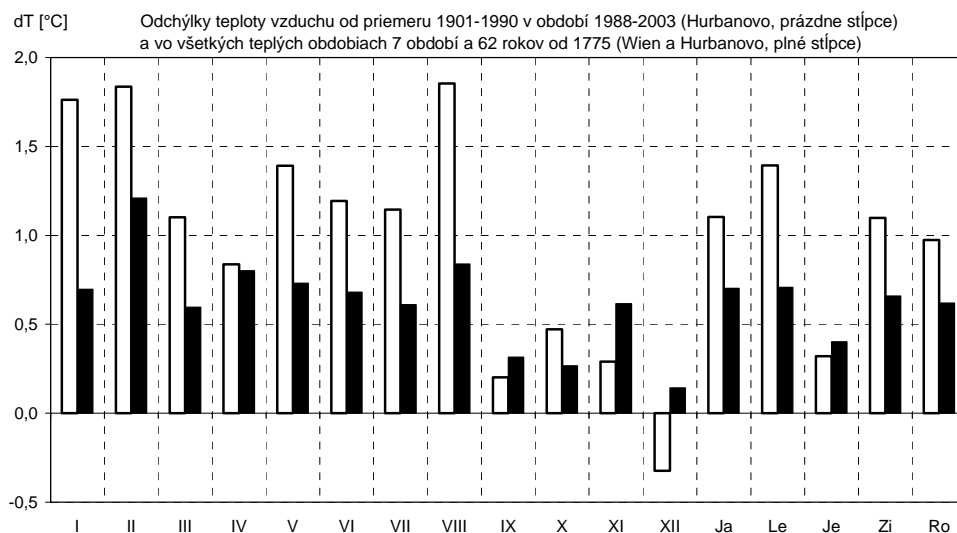


dy, keď aj atmosférická cirkulácia mala dlhodobejšie charakteristický režim pre teplejšie obdobia. Nie je však isté, že či takéto 5-ročné obdobia boli viazané iba na stredoeurópsky región, alebo mali aj širšiu platnosť (skôr nie). Je zrejme, že takto sa môžu pripravovať analógové scenáre iba na najbližšie desaťročia, keď ešte nebude zmena klímy nadobúdať veľké odchýlky v porovnaní s referenčnou klímou z obdobia 1901-1990 (1951-1980). Ak by sme mali za cieľ použiť globálny analóg teplejšej klímy, museli by sme siahnuť do dávnej minulosti (pred 5000-8000 rokmi) bez prístrojových meraní.

**Tab. 1. Odchýlky teploty vzduchu vo vybraných teplejších obdobiach vo Viedni (1817-1828) a v Hurbanove (ostatné) od priemeru z obdobia 1901-1990 (detaily sú aj na obr. 6).**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ja	Le	Je	Zi	Ro
<b>1817-1828</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>
1934-1939	1,0	0,9	1,1	0,4	0,1	1,0	0,8	0,2	0,1	0,2	0,9	0,1	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6
1943-1953	0,3	0,4	-0,3	1,4	0,4	0,0	0,4	0,9	1,0	-0,2	0,5	-0,1	0,5	0,4	0,4	0,2	0,4
1957-1961	0,2	1,6	0,7	0,7	0,0	0,9	-0,1	0,2	-0,2	0,9	1,5	1,7	0,5	0,3	0,7	1,3	0,7
1966-1977	0,6	2,0	0,7	0,3	0,6	0,4	0,4	0,1	-0,2	0,1	0,8	-0,2	0,5	0,3	0,2	0,9	0,5
1988-2003	1,8	1,8	1,1	0,8	1,4	1,2	1,1	1,9	0,2	0,5	0,3	-0,3	1,1	1,4	0,3	1,1	1,0
Priemer	0,70	1,21	0,60	0,80	0,73	0,68	0,61	0,84	0,31	0,27	0,62	0,14	0,70	0,71	0,40	0,66	0,62

**Pozn.:** Ja – jar, Le – leto, Je – jeseň, Zi – zima (XII-II), Ro – rok.



**Obr. 6. Ročný chod odchýlok teploty vzduchu od priemeru z obdobia 1901-1990 v Hurbanove v období 1988-2003 (prázdne stĺpce) a vo všetkých 7 teplejších obdobiach od roku 1775 (62 rokov, plné stĺpce, presné hodnoty všetkých vybraných období sú v tab. 1).**

Analógové scenáre majú väčší význam, ak ich používame ako kombináciu viacerých prvkov. Skúsme napríklad zistiť, že aké odchýlky od dlhodobého priemeru nadobudli v teplých obdobiach úhrny zrážok, vlhkosť vzduchu a trvanie slnečného svitu (tab. 2). Zvlášť dôležitá je zmena režimu zrážok, pretože sa všeobecne očakáva, že v dôsledku oteplenia budú narastať zimné a klesať letné úhrny zrážok. Vidíme, že v teplých obdobiach v minulosti sa dost' zvýšili úhrny zrážok v júni až v júli (prevažne v dôsledku intenzívnejších búrok) a poklesli zimné a jarné úhrny zrážok (asi vplyvom záveterných efektov pri západnej cirkulácii). Mohli by sme analyzovať aj zmeny cirkulačných pomerov v strednej Európe počas relatívne teplejších období. Tu ale nastupuje riziko, že relatívne teplejšie obdobia boli

primárne zapríčinené práve dočasne zmenenými cirkulačnými podmienkami a nie naopak. Zaujímavo vyznieva skutočnosť, že počas teplejších období sa často vyskytoval skorý nástup zimy, čo sa prejavilo v znížení decembrových a niekedy aj priemerov teploty vzduchu v jesenných mesiacoch (tab. 1).

**Tab. 2. Odchýlky (% pri R a S) niektorých prvkov vo vybraných teplejších obdobiach v Hurbanove v porovnaní s priemerom z obdobia 1901-1990 (A – 1988-2003, B - 6 období s 50 rokmi, R je úhrn zrážok v % normálu, U je relatívna vlhkosť vzduchu v %, e je tlak vodnej pary v hPa a S je trvanie slnečného svitu v % normálu).**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ja	Le	Je	Zi	Ro
<b>R (A)</b>	69,3	66,3	89,7	94,3	82,6	96,0	121,9	92,0	118,9	105,2	97,2	85,6	88,0	103,4	106,4	76,9	94,5
<b>R (B)</b>	92,5	98,7	89,1	89,1	91,0	105,2	108,1	97,1	97,4	99,0	100,2	94,5	89,9	103,7	99,0	97,4	97,4
<b>U (A)</b>	0,8	-3,0	-3,4	-3,3	-4,7	-3,7	-3,0	-4,0	0,4	-0,6	-0,9	-1,3	-3,8	-3,6	-0,4	-0,8	-2,2
<b>U (B)</b>	0,1	-1,0	-2,6	-2,3	-2,4	-2,0	-1,4	-1,6	-0,5	-0,3	-0,3	-0,4	-2,4	-1,7	-0,3	0,0	-1,2
<b>e (A)</b>	0,56	0,36	0,10	-0,08	-0,04	0,07	0,19	0,53	0,01	0,25	0,01	-0,21	-0,01	0,26	0,09	0,31	0,15
<b>e (B)</b>	0,27	0,37	0,03	0,08	0,00	0,10	0,26	0,36	0,06	0,14	0,24	-0,04	0,04	0,24	0,14	0,14	0,15
<b>S (A)</b>	98,2	128,3	106,0	101,0	108,4	103,3	101,0	109,5	91,5	100,2	105,6	119,9	105,4	104,5	97,0	115,0	104,5
<b>S (B)</b>	102,2	109,6	106,3	104,5	101,7	102,9	100,5	103,3	98,8	99,8	98,0	105,5	103,8	102,2	99,0	105,8	102,4

**Pozn.:** Vybrané teplé obdobia (B) – 1934-1939, 1943-1953, 1957-1961, 1966-1977, 1988-2003

Za zmienku určite stoja aj zmeny vlhkosťných pomerov. Relatívna vlhkosť vzduchu (U) bola takmer celoročne počas teplejších období nižšia (najviac od februára po august) a tlak vodnej pary (e) vyšší (najviac v júli, auguste, januári a februári). Zimný vývoj je vcelku očakávaný, v lete sa napriek rastu úhrnov zrážok (R) priemery U znížili, čo nepochybne súvisí so zmenou režimu zrážok (dlhšie suché obdobia a kratšie obdobia s intenzívnymi zrážkami). Na jar pozorujeme nielen pokles U ale aj pokles e. Je to dôsledok skoršieho nástupu teplého počasia a nižších úhrnov R. Trvanie slnečného svitu (S) bolo počas relatívne teplejších období vyššie ako dlhodobý priemer, najmä od decembra po apríl. Scenárne GCMs predpokladajú v zime malý pokles a v teplej časti roka mierny rast globálneho žiarenia (asi aj S), vývoj v doterajších relatívne teplých obdobiach (aj v poslednom – 1988-2003) bol odlišný, najmä kvôli nízkym úhrnom zrážok od decembra po máj. Ďalšie podrobnosti uvedieme pri kombinovaných scenároch, niektoré podrobnosti sú aj v Lapin et al. (1995, 1997).

**3) Scenáre pripravené stochastickým generátorom počasia:** Ide o scenáre, ktoré umožňujú aplikáciu časových radov akéhokoľvek počasia. Modelované súbory údajov môžu mať vopred zvolené odchýlky oproti štandardným referenčným obdobiám, pričom je možné zvoliť zmenu priemeru, distribučnej krivky, extrémov, variability, cyklov a iných parametrov. Na Slovensku sme doteraz takéto scenáre nepripravovali. Značné skúsenosti majú s nimi kolegovia v ČR (Dubrovský, 1996, 1997). Veľkú výhodu majú takéto súbory údajov najmä pri testovaní modelov a metód na odhad možných dôsledkov klimatickej zmeny (impaktné štúdie). Určité problémy vznikajú kvôli možnému narušeniu fyzikálnej konzistentnosti vzťahov medzi prvkami, pretože sa modelovo rieši predovšetkým vzťah štatistický. Takéto súbory väčšinou neobsahujú prirodzený kvázi náhodný časový a priestorový rozptyl hodnôt. Lapin et al. (2001) ukázali, že napríklad pri mesačných úhrnoch zrážok má časový a priestorový rozptyl na 203 staniach na Slovensku v období 1901-1990 určité konzervatívne vlastnosti, ktoré sa nemenia ani pri zmene počtu staníc a ani pri zmene obdobia.

**4) Inkrementálne (prírastkové) scenáre:** Sú pripravované ako sekvencie (matice) postupných odchýlok viacerých prvkov od ich dlhodobých priemerov v referenčnom období. V určitom období (1990-1995) boli veľmi obľúbené (najmä v radoch hydroológov) a podľa nich sa spracovalo veľa impaktných štúdií. Tieto scenáre zásadne nemajú elementárnu fyzikálnu a štatistickú konzistentnosť, pretože sa iba subjektívne kombinujú rôzne možnosti zmeny iných prvkov podľa predpokladaných zmien T a R (príklad v tab. 3). Požiadavka IPCC je iba v rozsahu „rozumnej fyzikálnej interpretovateľnosti“ zvolených prírastkov (nemali by sa navrhovať nepravdepodobné scenáre, napr.: rast T, pokles úhrnov R a rast U, alebo: rast T, pokles U, rast úhrnov R a pokles výparu). V súčasnosti sa už používajú iba na testovanie impaktných modelov (IPCC, 2001, Lapin et al., 1999, Melo, 2003). V časti o kombinovaných scenároch poukážeme na možnosti korektnejšej konštrukcie inkrementálnych scenárov založenej na regresnej a korelačnej analýze. Takýchto rôznych sekvencií s prijateľnou kombináciou prírastkov je možné urobiť niekoľko desiatok a z nich sa vyberajú iba tie, ktoré s určitosťou považujeme ako možné varianty.

**Tab. 3. Príklad inkrementálnych scenárov dlhodobých priemerov teploty vzduchu (odchýlka od dlhodobého priemeru v °C), úhrnov zrážok (odchýlka v %), relatívnej vlhkosti vzduchu (odchýlka v %) a počtu dní so snehovou pokrývkou (odchýlka v %) pre horizont roku 2030.**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>T1 2030</b>	+2,5	+2,4	+2,2	+1,9	+1,7	+1,6	+1,5	+1,6	+1,7	+1,9	+2,2	+2,4
<b>R1 2030</b>	+15	+10	+5	0	-5	-10	-10	-5	0	+5	+10	+15
<b>U1 2030</b>	-1	-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2	-1	-1	-1	-1
<b>N1 2030</b>	-40	-50	-90	N	N					N	-90	-60
<b>T1 2030</b>	+2,5	+2,4	+2,2	+1,9	+1,7	+1,6	+1,5	+1,6	+1,7	+1,9	+2,2	+2,4
<b>R2 2030</b>	+25	+20	+15	+10	+5	0	-5	-10	-5	0	+10	+20
<b>U2 2030</b>	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-4	-2	0	+1
<b>N2 2030</b>	-35	-45	-85	N	N					N	-90	-55

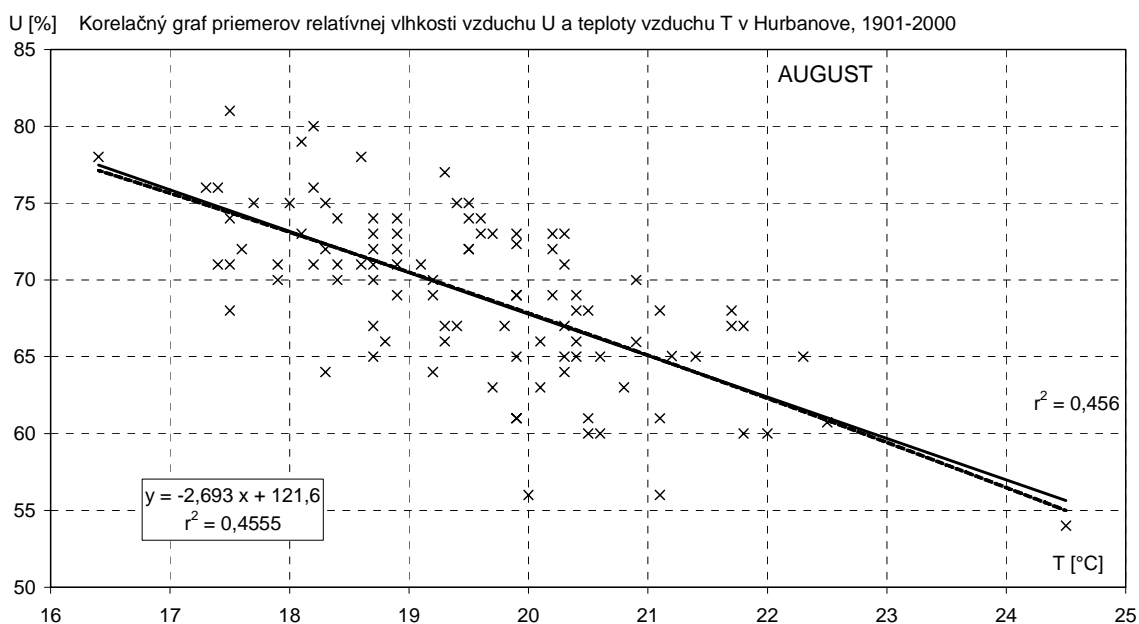
**Pozn.:** N – scenár nie je možné urobiť pre malý počet prípadov, odporúča sa –100%.

**5) Kombinované scenáre klimatickej zmeny:** Scenáre ako kombinácia viacerých metód (prístupov) použili viacerí autori, u nás najmä Lapin et al. (1995, 1997) v rámci riešenia projektov Country Study a Národný klimatický program SR a Hlavčová et al. (2000). Je všeobecne známe, že scenáre zmeny niektorých klimatických prvkov buď nie sú v ponuke výstupov GCMs a RCMs, alebo je ich kvalita taká neurčitá, že treba siahnuť po iných metódach prípravy scenárov. Týka sa to najmä relatívnej vlhkosti vzduchu (U), počtu dní so snehovou pokrývkou, sumy výšok snehovej pokrývky, potenciálnej a aktuálnej evapotranspirácie, rýchlosti vetra a mimoriadnych prípadov počasia v celom komplexe prvkov. Z ponuky GCMs vyberáme pri tom len hodnoverné scenáre a ostatné sa pokúsime dopočítať na základe štatistickej analýzy dlhých radov empirických pozorovaní alebo na základe známych fyzikálnych vzťahov (napr. rovníc výparu). Uvedme najprv príklad vzťahu teploty vzduchu (T), úhrnov zrážok (R) a U podľa mesačných údajov za obdobie 1901-2000 z Hurbanova po jednotlivých mesiacoch v tab. 4 a vybraný mesiac (august) aj na obr. 7 a 8.

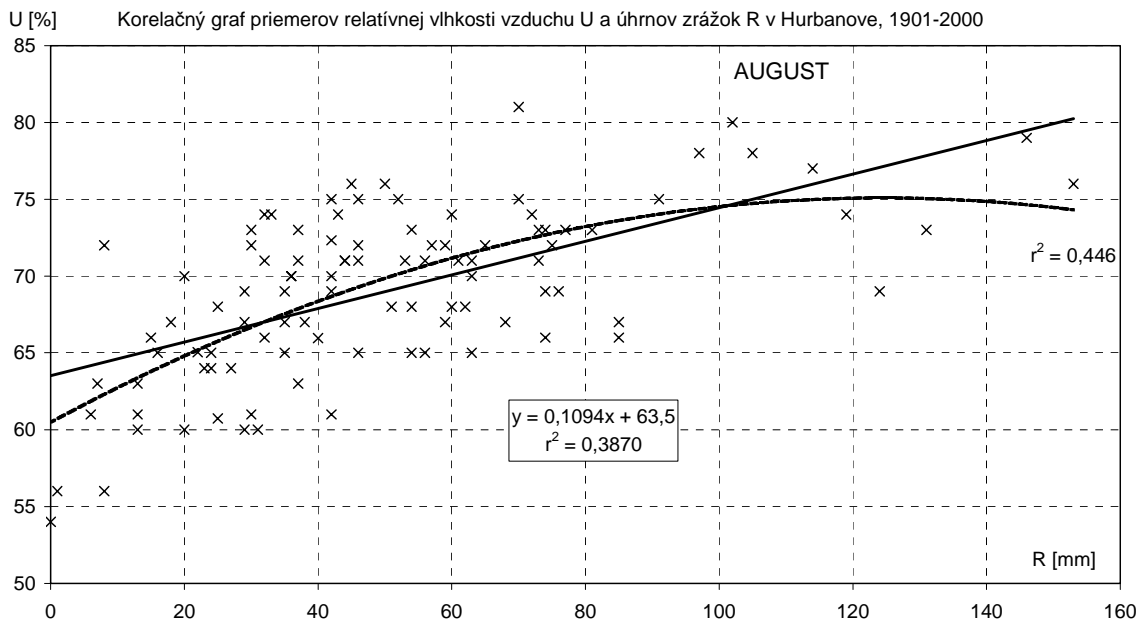
**Tab. 4. Korelačné koeficienty medzi mesačnými a sezónnymi priermi teploty vzduchu (T) a relatívnej vlhkosti vzduchu (U) ako aj mesačnými a sezónnymi úhrnmi zrážok (R) v Hurbanove v období 1901-2000.**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ja	Le	Je	Zi	Ro
<b>T&amp;R</b>	0,08	0,00	-0,04	<b>-0,22</b>	<b>-0,33</b>	<b>-0,22</b>	<b>-0,32</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,28</b>	-0,05	0,12	<b>0,25</b>	<b>-0,26</b>	<b>-0,29</b>	-0,08	0,14	-0,15
<b>U&amp;T</b>	0,11	0,01	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,44</b>	<b>-0,46</b>	<b>-0,60</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,41</b>	-0,14	-0,02	0,18	<b>-0,40</b>	<b>-0,61</b>	<b>-0,21</b>	0,08	<b>-0,36</b>
<b>U&amp;R</b>	-0,03	<b>0,30</b>	<b>0,56</b>	<b>0,64</b>	<b>0,70</b>	<b>0,65</b>	<b>0,64</b>	<b>0,62</b>	<b>0,54</b>	<b>0,57</b>	<b>0,43</b>	<b>0,36</b>	<b>0,70</b>	<b>0,68</b>	<b>0,47</b>	<b>0,36</b>	<b>0,65</b>

Všimnime si najprv údaje v tab. 4. Tučným písmom sú označené tie korelačné koeficienty, kde je tesnosť vzťahu významná aspoň na hladine 95% podľa t-testu (Nosek, 1972). V teplom polroku boli relatívne teplé mesiace významne zrážkovo chudobnejšie ako relatívne studené, iba v decembri to bolo významne naopak. Teplé mesiace mali od marca do septembra aj významne nižšiu U, v decembri to bolo na hranici významnosti opačnej korelácie. V auguste bola vôbec najtesnejšia korelácia medzi T a U ( $r = -0,67$ ), čo sme podrobnejšie znázornili na obr. 7. Je vidieť, že iba nepatrný počet augustov za 100 rokov sa z uvedeného vzťahu trochu vzdáľuje a na 1 °C rast priemernej T pripadá 2,7% poklesu priemernej U. Okrem januára bola celoročne tesná korelácia medzi U a R, najviac v máji a na jar ( $r = 0,70$ ). Je zrejme, že v januári narušenie tesnosti vzťahu spôsobuje výskyt snehovej pokrývky, v ostatných zimných mesiacoch je v Hurbanove snehová pokrývka skôr epizodickým javom. Na obr. 8 sme umiestnili korelačný graf U a R z augusta, keď bolo  $r = 0,62$  (kvôli konzistentnosti s koreláciou U a T na obr. 7). Je vidieť, že v tomto prípade lepšie vyhovuje kvadratická regresia, keď  $r^2$  dosahuje takmer rovnakú hodnotu ako pri korelácií U a T.

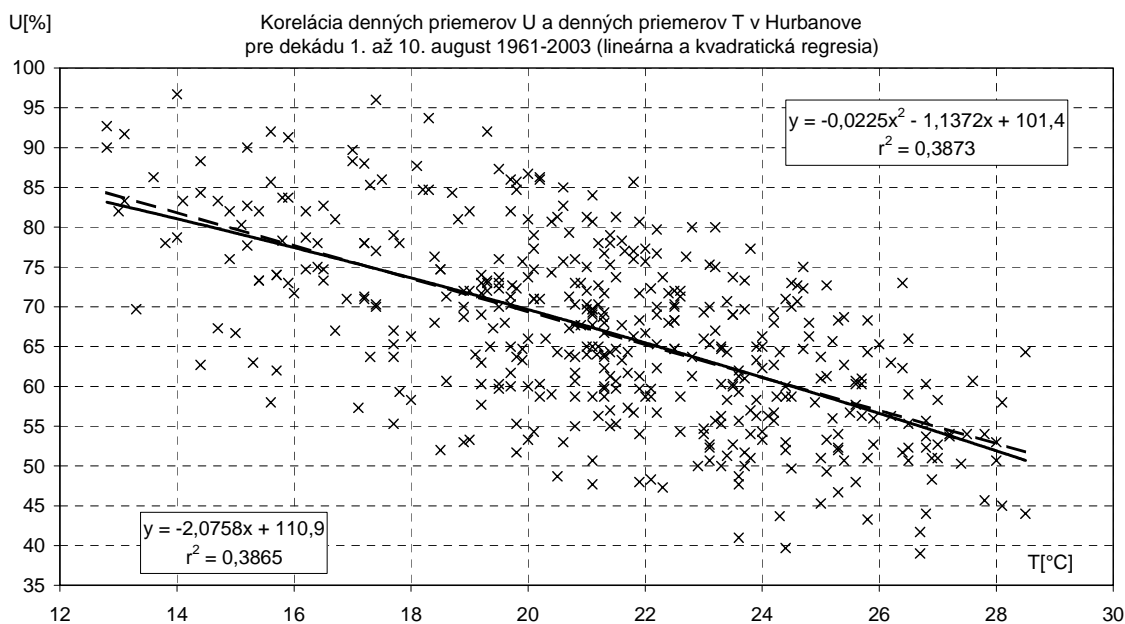


**Obr. 7. Korelačný graf mesačných priemerov relatívnej vlhkosti vzduchu (U) a mesačných priemerov teploty vzduchu (T) v Hurbanove pre august v období 1901-2000 (lineárna regresia s rovnicou a  $r^2$ , kvadratická regresia iba s  $r^2$ )**



**Obr. 8. Korelačný graf mesačných priemerov relatívnej vlhkosti vzduchu (U) a mesačných úhrnov zrážok (R) v Hurbanove pre august v období 1901-2000 (lineárna regresia s rovnicou a  $r^2$ , kvadratická regresia iba s  $r^2$ )**

Lepšia tesnosť korelačného indexu pri kvadratickej regresii vyplýva pravdepodobne z nelineárnosti vlhkosťných závislostí pri vysokých hodnotách R a vysokých hodnotách U (U sa nemôže zvyšovať ľubovoľne vysoko, lebo v teplom polroku iba zriedkakedy prekročí U v mesačnom priemere 80% aj pri veľmi vysokých úhrnoch R). Pre najčastejšie prípady úhrnov R je rast U asi o 2% pri zvýšení R o 10 mm (takmer 20% z augustového priemeru R).



**Obr. 9. Korelácia denných priemerov relatívnej vlhkosti vzduchu (U) a denných priemerov teploty vzduchu (T) v Hurbanove pre 1. dekádu augusta v období 1961-2003 (Lapin, 2004).**

Podobne by sme mohli pokračovať v korelačnej a regresnej analýze aj pre iné klimatické prvky. Ako zaujímavosť uvádzame ešte korelačné grafy denných hodnôt U a T, keďže sa čoraz častejšie konštruujú aj scenáre ako časové rady denných hodnôt (obr. 9). Vidíme, že korelačný graf sa veľmi podobá obr. 7 pre mesačné hodnoty, korelačný koeficient je o trochu menší ale stále ešte veľmi významný aj na hladine 99%. Rast denného priemeru T znamená pokles U asi o 2,1% v priemere.

**Tab. 5. Zmeny relatívnej vlhkosti vzduchu (U) v % na jeden °C rastu teploty vzduchu (T) a na 10% rastu mesačného úhrnu zrážok (R) v rôznych regiónoch na Slovensku (TP a CHP – teplý a chladný polrok, SW – juhozápad, Lapin et al., 1997).**

Región	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	TP	CHP
T-Nížiny na SW SR	0,1	0,1	-1,3	-0,6	-1,6	-1,0	-2,4	-3,0	-1,0	0,0	0,0	0,1	-2,6	-0,6
T-Iné nížiny v SR	0,1	0,1	-0,8	-0,4	-0,7	-0,6	-2,4	-2,7	-0,8	0,2	0,2	0,2	-2,0	-0,4
T-Kotliny v SR	0,1	0,1	-0,4	-0,6	-0,6	-0,4	-1,6	-1,7	-0,6	0,2	0,4	0,2	-1,6	-0,2
T-Horské oblasti v SR	0,1	0,1	-0,4	-0,8	-0,6	-0,7	-1,6	-1,7	-1,2	-1,0	-0,4	0,0	-1,6	-0,3
R-Nížiny na SW SR	0,1	0,2	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,2	0,3	1,0	0,3
R-Iné nížiny v SR	0,1	0,3	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,8	0,3
R-Kotliny v SR	0,2	0,3	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,7	0,2
R-Horské oblasti v SR	0,4	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,3

**Tab. 6. Zmeny počtu dní so snehovou pokrývkou (N) v % na jeden °C rastu teploty vzduchu (T) a na 10% rastu mesačného úhrnu zrážok (R) v rôznych regiónoch na Slovensku (Zi a CHP – zima a chladný polrok, SW – juhozápad, Lapin et al., 1997).**

Región	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Zi	CHP
T-Nížiny na SW SR	-20	-22	-44								-44	-28	-22	-32
T-Iné nížiny v SR	-12	-18	-36								-36	-22	-17	-26
T-Kotliny v SR	-8	-10	-26	-26							-32	-14	-12	-16
T-Horské oblasti v SR	-1	-1	-2	-14							-20	-6	-2	-4
R-Nížiny na SW SR	6	5	7								5	3	3	7
R-Iné nížiny v SR	3	3	5								5	3	3	5
R-Kotliny v SR	2	1	5	0							5	2	2	3
R-Horské oblasti v SR	1	1	1	0							5	1	1	2

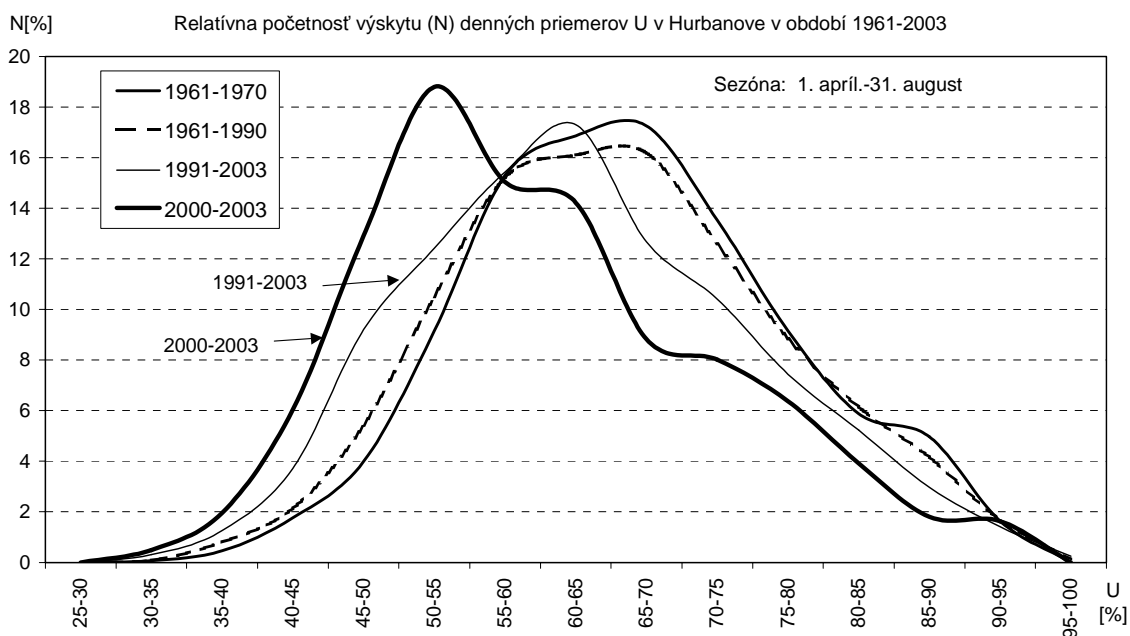
**Tab. 7. Zmeny sumy denných výšok snehovej pokrývky (SV) v % na jeden °C rastu teploty vzduchu (T) a na 10% rastu mesačného úhrnu zrážok (R) v rôznych regiónoch na Slovensku (Zi a CHP – zima a chladný polrok, SW – juhozápad, Lapin et al., 1997).**

Región	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Zi	CHP
T-Nížiny na SW SR	-28	-36	-46								-52	-42	-33	-51
T-Iné nížiny v SR	-22	-26	-45								-32	-34	-28	-47
T-Kotliny v SR	-18	-20	-34	-28							-30	-27	-24	-44
T-Horské oblasti v SR	-7	-6	-18	-16							-28	-12	-7	-16
R-Nížiny na SW SR	7	11	8								10	6	7	10
R-Iné nížiny v SR	5	5	7								10	6	7	10
R-Kotliny v SR	5	5	7	0							10	6	7	8
R-Horské oblasti v SR	6	3	5	0							8	7	9	10

Ak považujeme modifikované výstupy GCMs pre T a R za spoľahlivé scenáre budúceho vývoja a predpokladáme, že sa korelačné vzťahy medzi T, R, U a inými prvkami v najbližších desaťročiach významnejšie nezmenia, môžeme pomerne úspešne skonštruovať scenáre zmien takých prvkov, ktoré

nie sú dostatočne spoľahlivé z ponuky výstupov GCMs. V tab. 5 až 7 uvádzame ako príklad scenáre pre mesačné priemery  $U$ , počet dní so snehovou pokrývkou ( $N$ ) a sumy výšok snehovej pokrývky ( $SV$ ) spracované pre Country Study Slovakia (Lapin et al., 1997). Novšie spracovania korelácie medzi viacerými prvkami potvrdili, že na týchto kombinovaných (GCMs – Analógových) scenároch nemusíme nič meniť, len ich platnosť je obmedzená rastom teploty vzduchu asi do 2 °C.

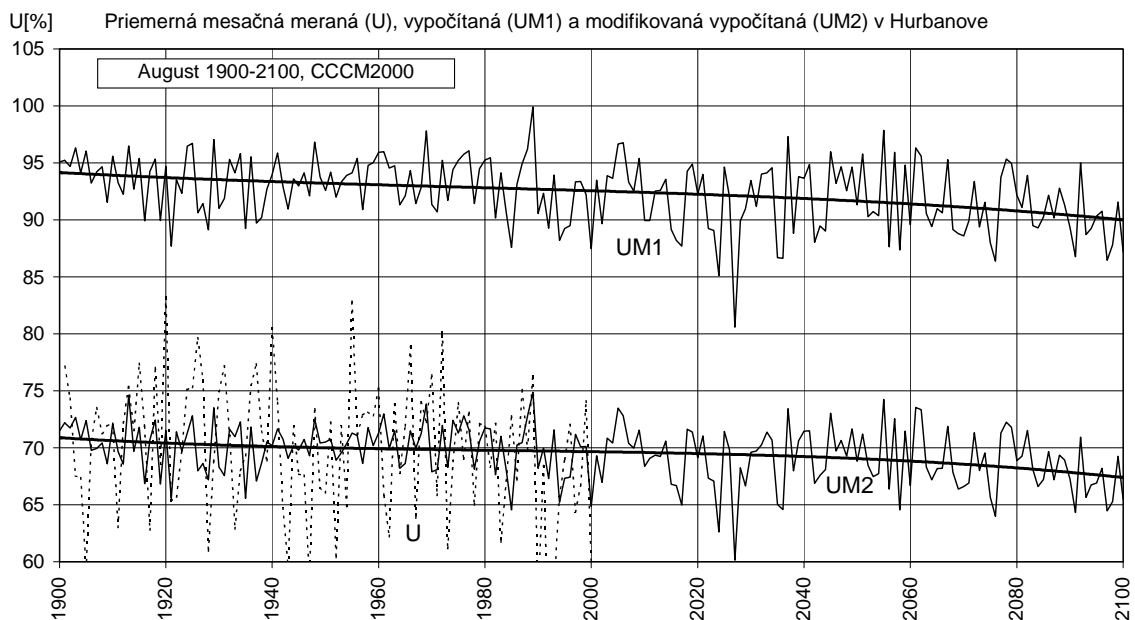
Ďalšou z možností je analýza najnovšieho vývoja klímy a detekcia možného začiatku klimatickej zmeny (change point of climate). Medzivládny panel pre klimatickú zmenu (IPCC, 2001) predpokladá niekoľko možností zmeny distribučnej krivky výskytu hodnôt  $T$  a  $R$ , s čím súvisí aj zmena výskytu iných klimatických prvkov. Na obr. 10 uvádzame jeden z takýchto príkladov analýzy pre denné priemery  $U$  v Hurbanove. Vidíme, že v posledných obdobiach (1991-2003, 2000-2003) došlo k značnej zmene distribúcie výskytu  $U$  s posunom o viac ako 5%, pričom krajné extrémny  $U$  sa priliš nezmenili.



**Obr. 10. Relatívna početnosť (hustota pravdepodobnosti) výskytu ( $N$ ) denných priemerov relatívnej vlhkosti ( $U$ ) v sezónach apríl-august 1961-2003 v triedach  $U$  po 5%; značné odchýlky má distribučná krivka v poslednom období 2000-2003 (Lapin, 2004).**

Ak predpokladáme pokračovanie takéhoto vývoja aj v nasledujúcich rokoch, tak môžeme odhadnúť veľkosť a tvar zmeny distribučnej krivky pri očakávanom raste teploty vzduchu. V mesiacoch apríl až august bol v období 1901-2003 priemerný trend rastu teploty vzduchu o 0,0169 °C za jeden rok (1,69 °C za 100 rokov), najviac v auguste (1,87) a najmenej v júli (1,29). Štvorročné obdobie 2000-2003 bolo o 1,59 °C teplejšie ako obdobie 1901-1990 (najviac v máji a auguste (o 3,16 a 3,13 °C) a najmenej v apríli a v júli (o 1,40 a 1,52 °C), v júni o 2,65 °C). To sú už hodnoty porovnateľné so scenármi klimatickej zmeny v časovom horizonte 2030 až 2075. Máme teda do určitej miery použiteľný analóg budúcej klímy na modelovanie možných dôsledkov zmeny klímy na zmeny iných klimatických prvkov. V doterajšej histórii klimatologických meraní sme tak veľké odchýlky za 4 roky ešte nemali.

Relatívnu vlhkosť vzduchu ( $U$ ) by sme mohli vypočítať aj nepriamo cez modifikované výstupy M2 teploty vzduchu ( $T$ ), mernej vlhkosti vzduchu ( $s$ ) a potom tlaku vodnej pary ( $e$ ) a ešte  $e$  v stave nasýtenia ( $e^*$ ) pre  $T$  z modelu CCCM2000. Ukazuje sa, že pre taký citlivý prvok ako je  $U$  sa môže stať uvedený výpočet ( $UM2$ ) nereprezentatívny, ako ukazuje aj obr. 11. Lepším je postup uvedený v tab. 5. Model CCCM2000 má u nás priemernú nadmorskú výšku 561 m, dosť vysoké úhrny zrážok, pomalý odtok na plochej orografii a vysokú evapotranspiráciu, ktorá sa približuje k potenciálnej evapotranspirácii. Za takých okolností priamo z modelu vyplynú pre august mesačné priemery  $UM1$  až okolo 92%, čo je o 20% viac v porovnaní so skutočnosťou. Po modifikácii  $T$  a  $e$  získame pre Hurbanovo nové časové rady  $UM2$ , ktorých výsledkom je nový časový rad  $U$ . Ten má podstatne menšiu variabilitu ako empirický rad  $U$  napriek tomu, že časové rady  $T$  a  $e$  majú variabilitu správnu. Podieľajú sa na tom ďalšie vplyvy – neuplatnenie Oldekopovej opravy (Nosek, 1972) na nelineárnosť vzťahu  $T$  a  $e^*$  pri veľkom variačnom rozpätí  $T$  a zhladené prirodzené odchýlky v mesačných priemeroch  $T$  a  $e$ .



**Obr. 11. Priemerná augustová relatívna vlhkosť vzduchu ( $U$ ) podľa merania v Hurbanove, vypočítaná z interpolovaných hodnôt teploty vzduchu a mernej vlhkosti vzduchu modelu CCCM2000 do stredu Slovenska v nadmorskej výške 561 m ( $UM1$ ) a vypočítaná z modifikovaných hodnôt  $T$  a  $e$  z modelu CCCM2000 pre Hurbanovo ( $UM2$ ).**

Do skupiny kombinovaných scenárov klimatickej zmeny môžeme zaradiť aj vytváranie časových radov zvláštnych prípadov počasia. Môžu to byť tzv. normálne, teplé a studené, suché a vlhké roky, prípadne aj epizódy mimoriadnych zrážok, mimoriadnych vln horúčav, dusna a sucha, pričom uvedené epizódy trvajú obvykle od 5 do 30 dní. Poznajúc závislosti a vzťahy medzi klimatickými prvkami v zmenenej klíme môžeme pripraviť modelové epizódy budúceho počasia na báze reálne sa vyskytujúvších mimoriadnych situácií v minulosti (kde aj dobre poznáme súvisiace dôsledky), a tiež na základe očakávanej zmeny priemerov teploty a mernej vlhkosti vzduchu. Podrobnejšie informácie o tejto metóde uvedieme v niektorom z nasledujúcich príspevkov.

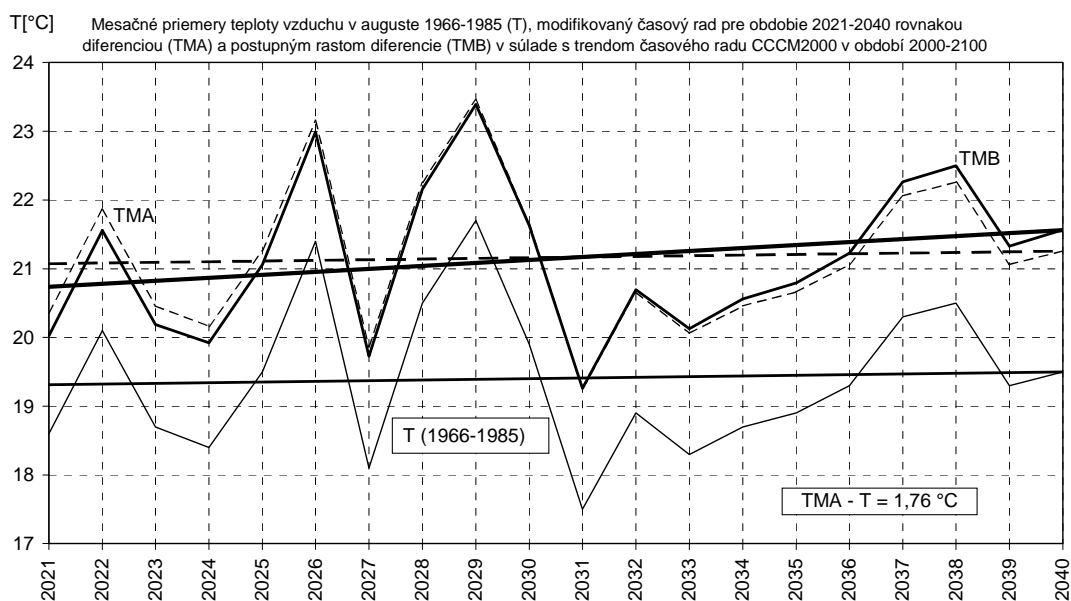


**Mimoriadne epizódy:** Zoberme teraz do úvahy iba jednoduchý príklad mimoriadne suchého počasia a mimoriadne vysokých úhrnov zrážok (Lapin et al., 2003b). Suché počasia je spojené s dlhotrvajúcim nedostatkom vody v pôde, čo môže zapríčiniť vysoká teplota vzduchu, nízka relatívna vlhkosť vzduchu, silný vietor, ale najmä nevhodné rozloženie a nízke úhrny zrážok. Mimoriadne vysoké úhrny zrážok môžu mať charakter intenzívnej jednotlivej búrky s lejakom v trvaní do 30 minút, prípadne 30 až 180 minút, alebo 1- až 5-denných výdatných zrážok (každý prípad môže zapríčiniť špecifický charakter škody). Ak nájdeme v minulosti vhodný prípad epizódy mimoriadneho počasia s podrobnou dokumentáciou, môžeme sa pokúsiť preniesť ho do budúcnosti, teda do zmenených klimatických podmienok a zmodifikovať podľa scenárov zmeny zrážok, teploty a vlhkosti vzduchu. Takisto môžeme zmodifikovať aj tzv. normálny a inak definovaný rok alebo mesiac.

Pri modifikácii mimoriadnych alebo charakteristických epizód počasia dodržiavame určité zásady aplikácie jednoduchých fyzikálnych a štatistických pravidiel, ktoré si môžeme ľahko overiť na podobných analógoch v minulosti. 1. Ak rastie teplota vzduchu a nemení sa relatívna vlhkosť vzduchu dochádza k zvyšovaniu sýtostného doplnku a potenciálnej evapotranspirácie v súlade s jednoduchou fyzikálnou formulou; 2. Pri vyššej teplote vzduchu je stav nasýtenia (napríklad na rovnako vysokej dolnej základni oblačnosti) spojený s vyššou mernou vlhkosťou vzduchu tiež v súlade s jednoduchou fyzikálnou formulou; 3. Cyklóny (aj jednotlivé búrky) s vyššou teplotou vzduchu obsahujú nielen viac vodnej pary ale majú aj väčší vodný obsah oblačnosti, väčšie vertikálne rýchlosti výstupných pohybov a väčší vertikálny turbulentný tok vlhkosti vzduchu; 4. V cyklónach (aj búrkach) s vyššou priemernou teplotou vzduchu padá obvykle podstatne viac zrážok (pri rovnakom rozdiel teploty medzi teplým a studeným sektorom a pri rovnakom počiatočnom vertikálnom zvrstvení teploty vzduchu); 5. Pri vyššej teplote vzduchu o 1 °C v teplom polroku je potrebný na nížinách Slovenska asi o 15% vyšší úhrn zrážok na udržanie rovnakej vlhkosti pôdy pri podobnom časovo rozdelení zrážok (čo je u nás málokedy splnené); 6. Pri vyššej teplote vzduchu sú na nížinách Slovenska v teplom polroku častejšie prípady dlhotrvajúcich období s malými zrážkami a krátkych období s veľmi intenzívnymi zrážkami. Na základe takýchto zásad pripravili scenáre epizód s mimoriadnymi zrážkami a epizód suchého počasia Lapin et al. (2003a,b).

**Náhradné časové rady:** Posledným príkladom kombinovaných scenárov je konštrukcia časových radov budúcej klímy v tých prípadoch keď nemáme k dispozícii vhodné výstupy modelov GCMs alebo RCMs (ide predovšetkým o časové rady denných údajov). Najjednoduchším riešením je vyhľadanie vhodného empirického časového radu údajov z minulosti, na ktorý aplikujeme nejakou metódou scenáre klimatickej zmeny. Vyhľadanie spomínaného empirického časového radu má kľúčový význam pre úspešnú konštrukciu scenára budúcej klímy. Dobré je brať do úvahy nasledujúce prípady: 1) Dlhé (normálové, referenčné) časové obdobie – malo by predstavovať také obdobie z minulosti, ktoré sa vyznačovalo zanedbateľným (alebo malým kladným) trendom teploty vzduchu, priemerom a variabilitou rozhodujúcich klimatických prvkov blízky dlhšiemu (reprezentatívnemu) obdobiu;

2) Normálny rok – výber takého roka, ktorý pri všetkých klimatických prvkoch nadobúda počas väčšiny mesiacov hodnoty medzi horným a dolným kvartilom, ročné priemery a sumy sú blízke dlhodobým priemerným charakteristikám a v žiadnom mesiaci neprekračujú horný alebo dolný decil (spomedzi všetkých takýchto rokov sa vyberie subjektívne najvhodnejší); 3) Nadnormálny (teplý, vlhký) a podnormálny (studený, suchý) rok – výber takého roka, ktorý pri všetkých klimatických prvkoch nadobúda počas väčšiny mesiacov hodnoty nad/pod dlhodobými priemerami, ročné priemery a sumy sú nad horným alebo pod dolným kvartilom a v aspoň jednom mesiaci prekračujú horný alebo dolný decil (spomedzi všetkých takýchto rokov sa vyberie subjektívne najvhodnejší); V konečnom výbere je potrebné brať do úvahy doplnujúcu (alebo alternatívnu) funkciu niektorých prvkov – nízke úhrny zrážok môže nahradiť vyššia teplota vzduchu, alebo nižšia relatívna vlhkosť vzduchu, alebo zvláštnym spôsobom rozdelené úhrny zrážok tak, že sa dosahuje veľký špecifický odtok (intenzívne lejaky); vyššiu teplotu vzduchu môže za určitých okolností nahradiť dlhšie trvanie slnečného svitu, nižšia relatívna vlhkosť vzduchu, prípadne aj nižšie úhrny zrážok atď. Na konečné charakterizovanie konkrétne vybraného roka je rozhodujúci počiatkový a konečný stav nejakého dôležitého a citlivého parametra – vlhkosť pôdy, odtok, fenologické fázy, úroda, hladina podzemnej vody...



**Obr. 12. Príklad náhradného časového radu teploty vzduchu na báze meraného časového radu v auguste 1966-1985 ako scenára pre obdobie 2021-2040 podľa dvoch metód (pripočítaním rovnakej diferencie v súlade so scenárom T pre časový horizont 2030 (TMA) a postupným rastom T v súlade s lineárnym trendom T v časovom rade M2 z výstupov CCCM2000 (TMB)).**

Vlastná modifikácia vybraného časového radu sa robí jednoduchým pripočítaním rovnakého rozdielu (scenár teploty vzduchu) alebo vynásobením kvocientom (scenár úhrnov zrážok) po mesiacoch pre každý deň vybraného 20- alebo 30-ročného obdobia a prenesenie tohto modifikovaného radu do budúcnosti so stredom v danom časovom horizonte (napr. 2030). Taký istý postup môžeme urobiť aj v prípade postupnej zmeny (rastu/poklesu) scenárov po jednotlivých mesiacoch a rokoch. V takom

prípade infiltrujeme do nového (modifikovaného) radu časový trend (obr. 12). Odporúčame použitie takéhoto scenára iba pre najbližšie obdobia (do roku 2050, napr. 2010-2040), pri väčších hodnotách rozdielov a kvocientov by mohlo dôjsť k významnému porušeniu fyzikálnej konzistentnosti nových časových radov. Na obr. 12 je iba časový rad mesačných priemerov T, je zrejmé, že rovnaké rozdiely boli pripočítané ku každému dennému priemeru T. Takéto scenáre majú význam najmä vtedy, keď sa použijú pre viac klimatických prvkov súčasne, napr. pre T, R, U a G (globálne žiarenie).

## Záver

V tomto príspevku sme predložili verejnosti iba stručné poznámky o niektorých metódach prípravy klimatických scenárov. Viac detailov je možné získať u autora, prípadne aj na našej web stránke [www.dmc.fmph.uniba.sk](http://www.dmc.fmph.uniba.sk) v časti Klimatické zmeny a projekt V2F35, kde je aj podrobnejší zoznam literatúry. Riešenie uvedených a ďalších relevantných projektov pokračuje aj v rokoch 2004-2006.

*Pod'akovanie:* Výsledky projektov VEGA č. 1/8255/01, č. 1/1042/04 (Grantová agentúra SR) a APVT-51-006502, ako aj údaje SHMÚ boli využité v tomto príspevku. Autori ďakujú za poskytnutie podkladov.

## Literatúra

- Dubrovský, M. (1996):** Validation of the stochastic weather generator Met&Roll. Meteorologické Zprávy 49, 129-138.
- Dubrovský, M. (1997):** Creating Daily Weather Series With Use of the Weather Generator. Environmetrics 8, 409-424.
- 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.
- Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J., Čunderlík, J. (2000):** Modelovanie vplyvu zmeny klímy na režim odtoku v regióne stredného Slovenska. In: NKP SR, Vol. V, No. 9, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 15-38.
- Lapin, M., Nieplová, E., Faško, P. (1995):** Regionálne scenáre zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku. In: NKP SR, Vol. II, No. 3, MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 17-57.
- Lapin, M., Závodský, D., Majerčáková, O., Mind'áš, J., Špánik, F. (1997):** Vulnerability and Adaptation Assessment for Slovakia. Final Report of the Slovak Republic's Country Study, Element 2, U.S. Country Studies Program, Slovak Ministry of the Environment, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava 1997, 219 pp.
- Lapin, M., Damborská, I., Melo, M. (1999):** Modifikované GCMs scenáre časových radov teploty vzduchu a zrážok pre Slovensko. In: Atmosféra 21.storočia, organizmy a ekosystémy, Bioklim. prac. dni, Zvolen, 207-214
- Lapin, M., Damborská, I., Melo, M. (2001):** Downscaling of GCM outputs for precipitation time series in Slovakia. Meteorologický časopis, IV, No. 3, SHMÚ, Bratislava, 29-40.
- Lapin, M., Tomlain, J. (2001):** Všeobecná a regionálna klimatológia. Vydavateľstvo UK, Bratislava, 184 pp.
- 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. (2004):** Detection of Changes in the Regime of Selected Climatological Elements at Hurbanovo, Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 34 (in print).
- Lorenz, E. (1967):** The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere. WMO Publ. 218. Geneva, 161 pp.
- Melo, M. (1996):** Klimatické scenáre. In: NKP SR, Vol. 3., No. 4, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 5-21.
- Melo, M. (2003):** Klimatické modely a ich využitie na odhad klimatických zmien na území Slovenska. Kandidátska dizertačná práca. GFÚ SAV, Bratislava, 155 s.
- Nosek, M. (1972):** Metody v klimatológii. Academia, ČSAV, Praha, 434 pp.
- SRES, Emissions Scenarios (2000):** Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nebojsa, Nakicenovic and Rob Swart (Eds.). Cambridge University Press, UK, 570 pp.

**Kontaktná adresa:**

Doc. RNDr. Milan Lapin, CSc., Oddelenie meteorológie a klimatológie, KAFZM, FMFI UK, Mlynská dolina, F1, 84248 Bratislava, Tel: ++421 2 60295 863, E-mail: [lapin@fmph.uniba.sk](mailto:lapin@fmph.uniba.sk), Web: [www.dmc.fmph.uniba.sk](http://www.dmc.fmph.uniba.sk)