

---

# GEOGRAFICKÝ ČASOPIS

---

52

2000

2

---

*Marián Melo, Milan Lapin\**

## TEPLOTNÉ SCENÁRE PRE SLOVENSKO ZALOŽENÉ NA VÝSTUPOCH KANADSKÝCH KLIMATICKÝCH MODELOV

**M. Melo, M. Lapin: Temperature scenarios for Slovakia based on Canadian climate models. Geografický časopis, 52, 2000, 2, 8 figs., 2 tabs., 19 refs.**

Global climate change owing to strengthened greenhouse effect is one of the most discussed problem in current climatology. One of the most important sources of information for creating future climate scenarios are the outputs from climate models. This paper summarises development of temperature scenarios for Slovakia on the basis of 4 model outputs from Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis in Victoria. The scenarios of monthly mean air temperature for Slovakia under the conditions of the greenhouse gases concentration doubling in the atmosphere (in the year 2050) are elaborated.

**Key words:** climate change, greenhouse effect, climate scenarios, general circulation models, air temperature

### ÚVOD

K jedným z najdiskutovanejších problémov v súčasnej klimatológii patrí otázka možnej klimatickej zmeny na Zemi v dôsledku antropogénne podmieneného rastu radiačne aktívnych (skleníkových) plynov v atmosfére. Za posledných 100 rokov sa priemerná ročná globálna teplota vzduchu v prízemnej vrstve na Zemi zvýšila o 0,5

---

\* Katedra meteorológie a klimatológie, Matematicko-fyzikálna fakulta UK, Mlynská dolina 1, 842 48 Bratislava

až 0,7° C. Otázkou zostáva, do akej miery bol tento rast zapríčinený prirodzeným vývojom a do akej miery ho ovplyvnil zosilnený skleníkový efekt atmosféry. Podľa IPCC 1995 (IPCC = Medzivládny panel pre klimatickú zmenu) pozorované oteplenie je síce v súlade s predpoveďami klimatických modelov, no súčasne má tiež podobnú veľkosť, ako je prirodzená klimatická variabilita. Pozorovaný rast mohol byť preto spôsobený touto prirodzenou variabilitou, alternatívne táto variabilita a iné ľudské faktory mohli mať kompenzačne zmierňujúci vplyv na prípadné ešte väčšie oteplenie, zapríčinené vplyvom rastúceho skleníkového efektu atmosféry.

V samotnej Európe sa v tomto storočí zvýšila priemerná ročná teplota približne o 0,8° C, pričom sú však zaznamenané veľké regionálne rozdiely. Najväčšie oteplenie (viac ako o 3° C za storočie) bolo zaznamenané v severnej a strednej európskej časti Ruska. Výrazné oteplenie (2° C za storočie) nastalo aj v juhozápadnej časti Európy (Pyrenejský polostrov, južná a stredná časť Francúzska), potom na Britských ostrovoch a pozdĺž Baltského pobrežia (1° C za storočie). Naopak v Grécku a v niektorých oblastiach východnej Európy sa na niektorých staniciach dokonca ochladilo (Watson et al. 1997).

V súčasnosti jedným z najdôležitejších zdrojov informácií pri vytváraní klimatických scenárov sú výstupy klimatických modelov. Klimatické modely zaznamenali v posledných rokoch značný rozvoj. V súčasnosti medzi najrozvinutejšie patria oceánicko - atmosférické modely všeobecnej cirkulácie (GCMs). V mnohých prípadoch sú atmosférická a oceánická zložka modelu vyvinuté oddelene a ich vzájomným prepojením vzniká prepojený GCM. V modeloch sú zastúpené aj ďalšie prvky a existujúce väzby klimatického systému. Viac informácií na túto tému možno nájsť v prácach Kalvová (1991), Trenberth (1992), Melo (1996, 1997).

Vo svete dnes existuje viacero klimatických centier, ktoré sa zaoberajú výskumom a vývojom klimatických modelov. V rámci riešenia projektu U.S. Country Studies Program (v rokoch 1994-1997) sme mali od NCAR Boulder, Colorado k dispozícii výstupy z týchto modelov: CCCM (1989), GISS (1982), GFDL (1989), GFDL (1991), UKMO (1989). Z uvedených modelov najlepšie simulovali súčasnú klímu na Slovensku modely CCCM (model Kanadského strediska pre modelovanie a analýzy klímy) a GISS (model Goddardovho ústavu pre výskum vesmíru pri NASA v New Yorku). S výsledkami týchto modelov sa možno zoznámiť vo viacerých prácach, ako napr. Lapin et al. (1995), Tomlain (1996), Hrvoľ (1996), Melo a Slabý (1996), Lapin et al. (1996), Lapin (1997), Lapin et al. (1997), Marečková et al. (1997) a iní. V týchto prípadoch väčšinou išlo o modely s rovnovážnym experimentom (koncentrácia skleníkových plynov v atmosfére sa zvýši na dvojnásobok jednorázovo). Výnimku tvoril iba model GFDL (1991) s postupným rastom koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére o 1% za rok (prechodový experiment). Takéto postupné zvyšovanie koncentrácie lepšie vystihuje reálny stav, nakoľko je vyjadrená postupná reakcia klimatického systému na radiačnú poruchu v dôsledku veľkej tepelnej kapacity oceánu.

V súčasnosti sa nám podarilo získať nové modelové výstupy z Kanadského strediska pre modelovanie a analýzy klímy vo Victorii (Britská Kolumbia, Kanada). V tomto stredisku doteraz vyvinuli štyri klimatické modely. Prvým je atmosférický model 1. generácie (CCCM 1989), druhým atmosférický model 2. generácie (CCCM 1992), tretím prepojený model 1. generácie (CCCM 1997), z ktorého máme k dispozícii dva súbory modelových výstupov (jeden iba pre rast skleníkových plynov a druhý pre rast skleníkových plynov spolu aj so zahrnutím účinkov rastu aerosólov) a

v súčasnosti je kompletizovaný v poradí už štvrtý model, a to atmosferický model 3. generácie, z ktorého však výstupy zatiaľ nie sú k dispozícii. Pracovať môžeme teda spolu so štyrmi súborami modelových výstupov troch klimatických modelov.

Cieľom tohto príspevku je analyzovať vývoj teplotných scenárov pre Slovensko na základe spomínaných štyroch súborov modelových výstupov troch kanadských klimatických modelov.

## METÓDY PRÁCE

Pri analýze teplotných scenárov sme vychádzali z modelových výstupov Kanadského strediska pre klimatické modelovanie a analýzy vo Victorii (modely CCCM 1989, 1992, 1997) a z nameraných hodnôt teploty vzduchu na Slovensku v období rokov 1951-1980 (v prípade Hurbanova 1900-1998) podľa archívu SHMÚ v Bratislave.

Pri všetkých modeloch postupujeme jednotnou metodikou kvôli vzájomnému porovnávaniu dosiahnutých výsledkov. Preto boli pre tento účel znovu prepracované scenáre z modelu CCCM 1989, ktoré už boli v literatúre uverejnené predtým (Lapin et al. 1995 a iní). Pri každom modelovom výstupe máme k dispozícii údaje zo šiestich gridových bodov stredoeurópskej oblasti. Vzhľadom na to, že horizontálne rozlíšenie sa prakticky pri týchto kanadských modeloch nemenilo, vo všetkých modeloch ide o tie isté zemepisné polohy gridových bodov. Nadmorská výška týchto bodov sa zmenila len zanedbateľne (maximálne do piatich metrov), pričom ich priemer je úplne rovnaký. Prvý gridový bod sa nachádza v Slovinsku východne od Ljubljany (46,39N; 15,00E; 597 m n.m.), druhý je v južnom Maďarsku (49,39N; 18,75E; 616 m n.m.), tretí v rumunských Karpatoch (46,39N; 22,50E; 554 m n.m.), štvrtý východne od Prahy (50,10N; 15,00E; 442 m n.m.), piaty v Sliezske západne od Katovic (50,10N; 18,75E; 531 m n.m.) a šiesty v juhovýchodnom Poľsku (50,10N; 22,50E; 566 m n.m.). Ako je vidieť z nadmorských výšok jednotlivých bodov, modely majú veľmi zjednodušenú a zhladenú orografiu, nakoľko v stredoeurópskej oblasti poznajú len spoločné alpsko-karpatské pohorie bez Panónskej panvy. Hodnoty v jednotlivých uzlových bodoch teda vyjadrujú určitý priestorový klimatický priemer celej okolitej oblasti. Z jednotlivých gridových bodov poznáme hodnoty priemerných mesačných teplôt vzduchu v jednotlivých rokoch 1900-2100 (model CCCM 1997), prípadne v jednotlivých obdobiach 1xCO<sub>2</sub>, 2xCO<sub>2</sub> (modely CCCM 1989, CCCM 1992). V prípade modelu CCCM 1997 bolo za obdobie 1xCO<sub>2</sub> zvolené dvadsaťročné obdobie 1971-1990 a za obdobie 2xCO<sub>2</sub> je považované dvadsaťročné obdobie 2041-2060, z ktorých sa vypočítavali priemerné hodnoty.

Z týchto šiestich gridových bodov stredoeurópskej oblasti sme interpoláciou získali jednu spoločnú hodnotu charakteristickú pre celé Slovensko. Jednotlivým gridovým bodom sme prisúdili váhy vzhľadom na ich vzdialenosť od Sliača (t.j. zhruba od stredu Slovenska). Najväčší dôraz sa takto kladie na piaty a druhý gridový bod. V prípade porovnávania hurbanovskej série údajov je špeciálne pre tento prípad urobená interpolácia modelových výstupov (váhy vzhľadom na vzdialenosť) pre polohu Hurbanova.

V prvej časti práce testujeme schopnosť jednotlivých modelov simulovať súčasnú klímu na Slovensku za obdobie rokov 1951-1980 (tzv. kontrolná klíma; 1xCO<sub>2</sub>). Za skutočnú priemernú mesačnú teplotu vzduchu Slovenska (1951-1980) považujeme

hodnotu, ktorá je vypočítaná ako vážený priemer (vzhľadom na nadmorskú výšku) z nameraných údajov trinástich reprezentatívnych klimatologických staníc na Slovensku v uvedenom období (Lapin et al. 1997). V prípade najnovších modelových výstupov (CCCM 1997 aj s aerosólom) je urobená navyše aj podrobnejšia validácia modelu pre stanicu Hurbanovo za obdobie 1900-1998.

V druhej časti práce sú na základe jednotlivých modelových výstupov vypracované scenáre priemerných mesačných teplôt vzduchu na Slovensku v prípade klímy pri zdvojnásobenej koncentrácii skleníkových plynov v atmosfére, v porovnaní so súčasnosťou (tzv. klíma zosilneného skleníkového efektu atmosféry;  $2\times\text{CO}_2$ ), pričom podľa najnovšieho kanadského modelu nastane toto obdobie okolo roku 2050. Čas stavu  $2\times\text{CO}_2$  samozrejme závisí od toho, ktorý emisný scenár sa prijme; scenáre IPCC IS92 predpokladajú zdvojnásobenie koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére v porovnaní s obdobím pred rokom 1750 medzi rokmi 2050 (pri najpesimistickejšom scenári IS92e) a nad 2100 (pri optimistických scenároch IS92d, IS92c). V najpravdepodobnejšom variante (scenáre IS92a, IS92b) sa predpokladá, že zdvojnásobenie skleníkových plynov v atmosfére nastane okolo roku 2070 (IPCC 1994).

## POPIS MODELOV

Model CCCM 1989 patrí k modelom so simuláciou jednorázového zvýšenia koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére na dvojnásobok. Model berie do úvahy iba najvyššiu povrchovú vrstvu oceánu. Horizontálna rozlišovacia schopnosť modelu je  $3,71^\circ$  po zemepisnej šírke a  $3,75^\circ$  po zemepisnej dĺžke. Výsledky z tohto typu modelu boli širšie prezentované vo viacerých prácach aj na Slovensku (Lapin et al. 1995, Melo a Slabý 1996, Lapin et al. 1997).

Model CCCM 1992 predstavili McFarlane et al. (1992), Boer et al. (1992). Atmosferický model je spojený s oceánickým modelom, ktorý má jednoduchú premiešavaciu vrstvu s termodynamickou morskou-ladovcovou zložkou. V porovnaní s predchádzajúcim modelom sa odlišuje v numerickom spracovaní základných rovníc, ako aj v niektorých fyzikálnych parametrizáciách. Atmosferický model má 10 vertikálnych hladín, pričom vrchol najvyššej vrstvy je stanovený na hladine 5 mb. Tento model používa ako vlhkosnú premennú veličinu mernú vlhkosť vzduchu, kým predchádzajúci model deficit teploty rosného bodu. Model má prepracovanejší radiačný ohrev vrátane denného a ročného cyklu a oveľa zložitejšie spracovanie krajinných povrchových procesov. Na výpočet pôdnej vlhkosti je použitý model jednoduchej pôdnej vrstvy s vymedzenou poľnou kapacitou a pôdnymi vlastnosťami. Poľná kapacita závisí od vegetácie a pôdneho typu. Oceánická a morská-ladovcová zložka je veľmi zjednodušená (model berie do úvahy 50 m hlboký oceán, teda skôr premiešavaciu vrstvu v oceáne), hoci sa upresnili oceánické tepelné toky pre otvorený oceán i pod morským ľadom. Pri znížení povrchovej teploty premiešavacej vrstvy oceánu na bod mraznutia morskej vody sa začína formovať ľad.

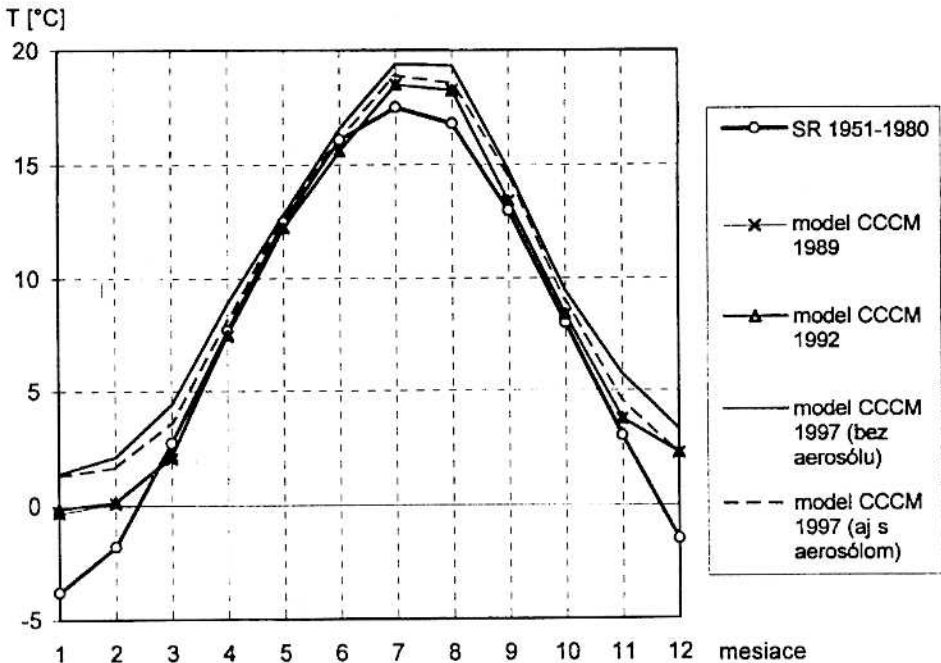
Model CCCM 1997 je prepojeným GCM 1. generácie. Túto 1. verziu kanadského globálneho prepojeného modelu predstavil kolektív pracovníkov Kanadského strediska pre klimatické modelovanie a analýzy v roku 1997. Atmosferickou zložkou tohto modelu je v podstate atmosferický model 2. generácie (CCCM 1992) a oceánická zložka vychádza z modelu Geofyzikálneho laboratória dynamiky tekutín Princetonskej univerzity (New Jersey, USA) GFDL MOM1.1. Atmosferická časť modelu má horizontálne rozlíšenie zhruba  $3,7^\circ \times 3,7^\circ$  (spektrálny model s 32 vlnami) a 10 verti-

kálnych hladín. Oceánická časť modelu má horizontálne rozlíšenie  $1,8^\circ \times 1,8^\circ$  a 29 vertikálnych hladín. Model predpokladá postupný rast skleníkových plynov v atmosfére, zodpovedajúci pozorovaniam od roku 1850 do súčasnosti a rast o 1 % za rok až do roku 2100. Model tiež predpokladá priame účinky síranových aerosólov prostredníctvom rastu albeda povrchu. Zdvojnásobenie koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére je určené na obdobie medzi rokmi 1980 a 2050.

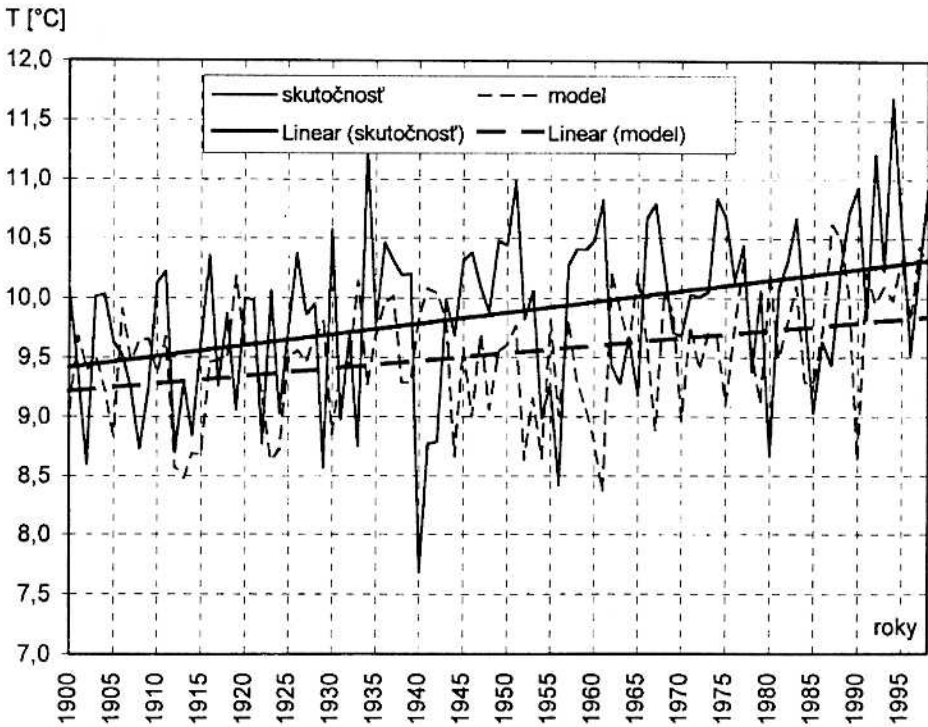
## VÝSLEDKY A DISKUSIA

Jednotlivé modely simulujú súčasnú klímu na Slovensku (v rokoch 1951-1980) pomerne veľmi dobre. Reálne vystihujú celkový ročný chod teploty vzduchu na Slovensku s maximom v júli a minimom v januári. Ako vidieť z obr. 1, najlepšie vystihujú tento stav v jarnom a jesennom období, kedy sa modelované hodnoty takmer zhodujú so skutočne pozorovanými. V letnom období modelované hodnoty sú mierne vyššie v porovnaní so skutočnosťou (najmä v júli a v auguste zhruba o 1 až  $2^\circ \text{C}$ ) a v zimnom období ešte o niečo vyššie (maximálne v januári - zhruba až o  $3,5^\circ \text{C}$  až  $5^\circ \text{C}$  vyššie).

Pri podrobnejšom rozbere je na príklade Hurbanova (obr. 2) vidieť, že skutočná priemerná ročná teplota vzduchu v rokoch 1900-1998 je síce v Hurbanove o niečo vyššia ( $9,87^\circ \text{C}$ ) ako je modelovaná pre túto polohu ( $9,53^\circ \text{C}$ ), avšak model (CCCM 1997 aj s aerosólom) má v tejto geografickej lokalite vyššiu nadmorskú výšku (557 m n.m.) ako je v Hurbanove v skutočnosti (115 m n.m.). Po prípadnej korekcii teplôt na rovnakú nadmorskú výšku aj v tomto prípade možno v konečnom



Obr. 1. Ročný chod teploty vzduchu na Slovensku pre 1951-1980 a modelové simulácie.

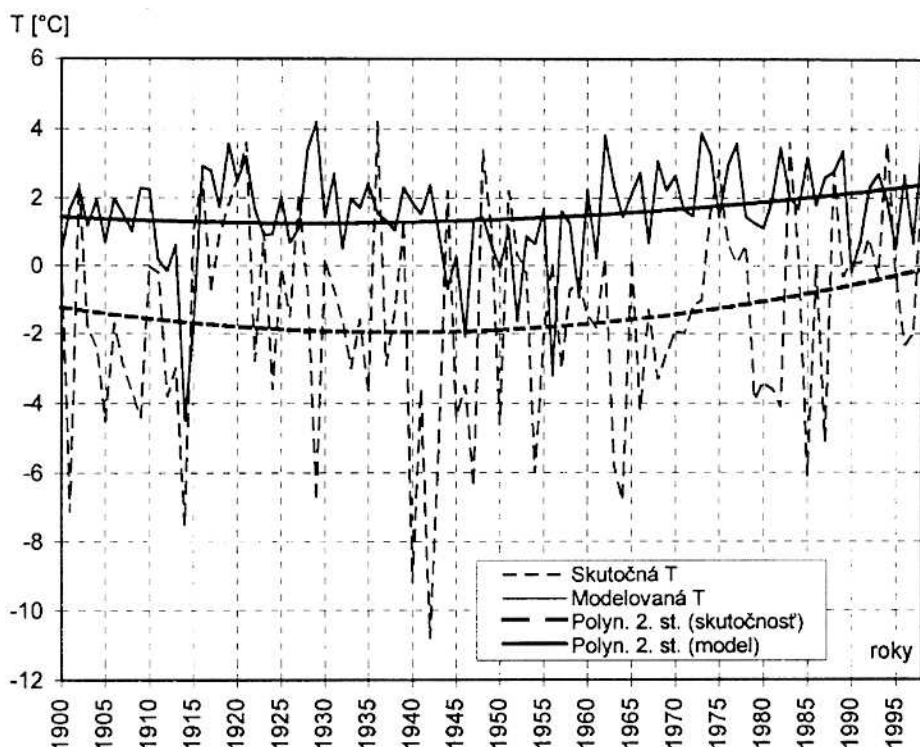


Obr. 2. Priemerná ročná teplota vzduchu v rokoch 1900-1998 v Hurbanove a modifikovaný modelový výstup pre Hurbanovo na základe modelu CCCM 1997 (aj s aerosólom).

dôsledku očakávať, že model mierne nadhodnotí v tejto geografickej lokalite teplotu vzduchu. Podobné závery platia aj pre obr. 3 a 4, kde sú znázornené priemerné januárové a júlové teploty vzduchu v rokoch 1900-1998 v Hurbanove (skutočné a modelované). V prípade januárových teplôt model ich nadhodnocuje aj bez prípadnej korekcie na rovnakú nadmorskú výšku. Teplotné priebehy sú zhladené polynómom 2. stupňa a môžeme z nich usudzovať, že majú veľmi podobný priebeh pre skutočný aj modelovaný stav.

V rokoch 1900-1998 bola pri pozorovanej priemernej ročnej teplote vzduchu v Hurbanove dosiahnutá amplitúda  $4,01^{\circ}\text{C}$  a smerodajná odchýlka  $0,71^{\circ}\text{C}$ , kým model dosiahol pre túto lokalitu amplitúdu  $2,25^{\circ}\text{C}$  a smerodajnú odchýlku  $0,51^{\circ}\text{C}$ . Zo vzájomného porovnania je vidieť, že rady priemerných ročných teplôt vzduchu v období 1900-1998 majú v skutočnosti väčšiu variabilitu ako simuluje model. Podobné výsledky je vidieť aj pri štúdiu smerodajnej odchýlky pre priemerné januárové a priemerné júlové teploty vzduchu v rokoch 1900-1998 v Hurbanove. Aj v týchto prípadoch je v skutočnosti väčšia variabilita hodnôt teplotných radov ako pri modelovej simulácii.

Zaujímavé výsledky je vidieť pri časovom štúdiu dosiahnutých maximálnych a minimálnych mesačných teplotných extrémov v jednotlivých rokoch 1900-1998 na



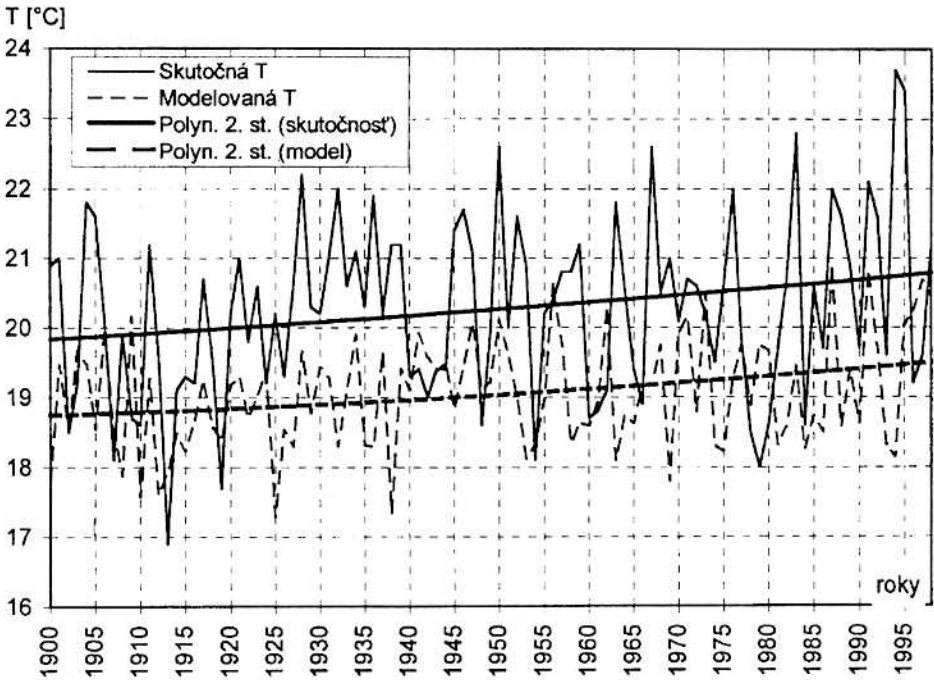
Obr. 3. Priemerná januárová teplota vzduchu v rokoch 1900-1998 v Hurbanove a modelový výstup modifikovaný pre Hurbanovo na základe modelu CCCM 1997 (+ aerosól).

príklade Hurbanova. V tomto období bola v ročnom chode maximálna mesačná teplota vzduchu dosiahnutá v skutočnosti až v 60 % prípadoch v mesiaci júl (podľa modelu v 61 % prípadoch), v 27 % prípadoch v mesiaci august (podľa modelu 39 %), v 13 % prípadoch v mesiaci jún (podľa modelu 0 %). Minimálna mesačná teplota vzduchu bola v ročnom chode dosiahnutá v skutočnosti v 55 % prípadoch v januári (podľa modelu 48 %), v 24 % prípadoch vo februári (podľa modelu 37 %) a v 21 % prípadoch v decembri (podľa modelu 12 %). V období rokov 1900-1998 sa podľa modelu vyskytli ešte v 2 % prípadoch najnižšie mesačné teploty vzduchu aj v novembri a v 1 % prípadoch aj v mesiaci marec.

Pri porovnávaní modelovanej a pozorovanej priemernej ročnej teploty vzduchu od roku 1900 do roku 1998 v Hurbanove môžeme skonštatovať, že podľa lineárneho trendu (obr. 2) bol v skutočnosti dosiahnutý rast za toto obdobie o  $0,90^{\circ}\text{C}$ , kým modelový rast o  $0,60^{\circ}\text{C}$ .

Kvôli porovnaniu ešte uvádzame, že pri globálnej priemernej ročnej teplote vzduchu od roku 1900 do roku 1990 je v oboch prípadoch (modelovaná aj pozorovaná hodnota) dosiahnutý jednotný rast tejto teploty zhruba o  $0,6^{\circ}\text{C}$ .

Na obr. 5 je znázornená priemerná ročná teplota vzduchu v Hurbanove (1900-1998) na základe 7-ročného klzavého priemeru. Ako je vidieť z tohto obrázku, model



Obr. 4. Priemerná júlová teplota vzduchu v rokoch 1900-1998 v Hurbanove a modelový výstup modifikovaný pre Hurbanovo na základe modelu CCCM 1997 (+ aerosól).

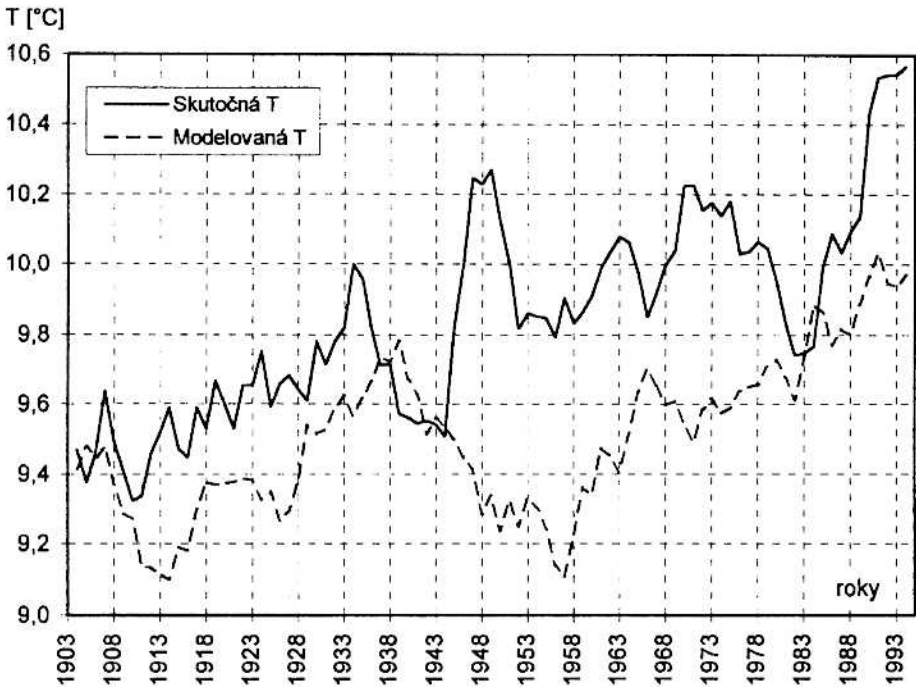
simuluje pri celkovo rastúcom teplotnom trende čiastočný, ale mierny pokles v štyridsiatych a päťdesiatych rokoch, ktorý však v skutočnosti kvôli väčšej variabilite nie je až taký zrejímavý.

Celkovo môžeme skonštatovať, že kanadské modely pomerne veľmi dobre vystihujú reálne teplotné pomery na Slovensku, aj keď v priemere mierne nadhodnocujú skutočné teploty vzduchu na Slovensku.

Podľa modelu CCCM 1997 je zdvojnásobenie koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére určené na obdobie medzi rokmi 1980 a 2050. Za toto obdobie je pri predpoklade, že berieme do úvahy model CCCM 1997 aj s aerosólom (tab. 1), modelom simulovaný rast priemernej ročnej teploty vzduchu pre Slovensko o  $1,51^{\circ}\text{C}$ , čo je nižšia hodnota ako je rast globálnej teploty vzduchu podľa tohto istého modelu ( $1,9^{\circ}\text{C}$ ). Ak berieme do úvahy len rast skleníkových plynov (t.j. bez zahrnutia účinkov aerosólov), je tento rast teploty pre Slovensko až  $2,27^{\circ}\text{C}$  (globálny rast  $2,7^{\circ}\text{C}$ ). Rozdiel  $0,76^{\circ}\text{C}$  (v globálnom meradle  $0,8^{\circ}\text{C}$ ) predstavuje ochladzujúci efekt aerosólov. Môžeme teda konštatovať, že aerosóly sú pri rastúcom skleníkovom efekte negatívnou spätnou väzbou v klimatickom systéme.

Podľa IPCC 1997 môžu síranové aerosóly redukovať radiačné otepľovanie atmosféry spôsobené  $\text{CO}_2$  v strednej Európe skoro o 50% a v niektorých oblastiach na Zemi môže dôjsť pri rastúcom skleníkovom efekte atmosféry dokonca k celkovému ochladeniu klímy.





Obr. 5. Priemerná ročná teplota vzduchu na základe 7-ročného kľzavého priemeru v Hurbanove v rokoch 1900-1998 - skutočná a modelová.

Výsledky dvoch najnovších modelových výstupov môžeme porovnať s predchádzajúcim modelom CCCM 1992 (tab. 1), nakoľko v tomto modeli bol použitý ten istý atmosférický model bez aerosólového efektu. Pri zdvojnásobení skleníkových plynov v atmosfére vychádza hodnota priemerného ročného oteplenia na Slovensku až na  $3,44^{\circ}\text{C}$  (globálna  $3,50^{\circ}\text{C}$ ). Rozdiel medzi hodnotami experimentov s prechodovou odozvou a rovnovážnou odozvou  $1,17^{\circ}\text{C}$  (v globálnej mierke  $0,8^{\circ}\text{C}$ ) predstavuje ochladzujúci účinok oceánu na klímu Slovenska (globálnu klímu) pri jeho zahrnutí do modelu. Výsledok poukazuje na veľmi významnú úlohu svetového oceánu v klimatickom systéme a jeho prejavujúcu sa negatívnu spätnú väzbu pri raste skleníkového efektu atmosféry.

V dôsledku zahrnutia vertikálneho premiešavania sa medzi povrchovými a hĺbkovými vodami oceánu dôjde podľa CCCM 1997 v oblasti južného oceánu okolo Antarktídy a v oblasti medzi Labradorom a Grónskom, napriek globálnemu otepleniu, dokonca k miernemu lokálnemu ochladeniu.

Podľa prvého modelu CCCM 1989 (tab. 1) zvýšenie priemernej ročnej teploty vzduchu na Slovensku pri zdvojnásobenej koncentrácii skleníkových plynov v atmosfére dosiahne najvyššiu hodnotu, a to až  $3,47^{\circ}\text{C}$ .

Keď porovnáme navzájom výsledky všetkých štyroch modelových simulácií (tab. 1), zistíme, že podľa najnovších modelov dosiahne rast priemernej ročnej teploty vzduchu na Slovensku pri klíme zosilneného skleníkového efektu atmosféry nižšie

hodnoty, ako sa pôvodne v prvých modeloch očakávalo (pokles na 43,52 % pôvodnej hodnoty).

**Tab. 1. Ročný chod zmien teploty vzduchu ( $2xCO_2 - 1xCO_2$ ) v °C podľa jednotlivých kanadských modelov (CCCM)**

	CCCM 1989	CCCM 1992	CCCM 1997 (bez aerosólu)	CCCM 1997 (aj s aerosólom)
I	3,51	3,40	1,96	0,86
II	4,26	4,17	2,12	1,47
III	4,18	4,09	2,16	1,74
IV	3,29	3,24	1,85	1,48
V	2,82	2,85	1,79	1,38
VI	3,25	3,26	2,26	1,71
VII	3,71	3,69	2,61	1,93
VIII	3,79	3,81	2,88	1,87
IX	3,60	3,64	2,98	1,98
X	3,31	3,32	2,60	1,78
XI	2,99	2,96	2,13	1,18
XII	2,92	2,83	1,93	0,77
Rok	3,47	3,44	2,27	1,51

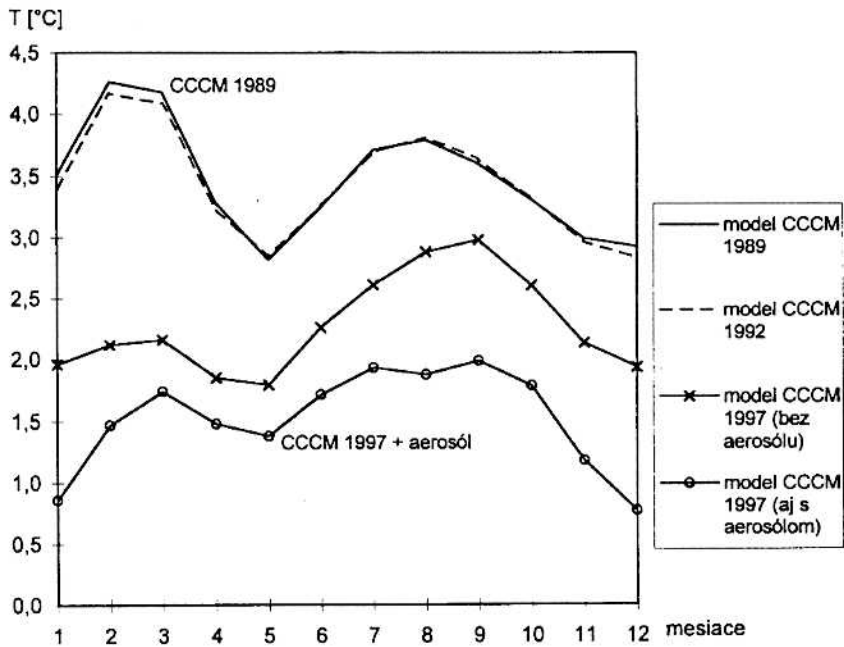
Pri podrobnejšom štúdiu ročného chodu zmien teploty vzduchu pri zdvojnásobenej koncentrácii skleníkových plynov v atmosfére ( $2xCO_2$ ) v porovnaní so stavom  $1xCO_2$  (tab. 1, obr. 6) je vidieť, že kým pri prvých modelových simuláciách (CCCM 1989 a CCCM 1992) bol očakávaný najvyšší rast v zimných mesiacoch (vo februári o  $4,26^\circ C$  a v marci o  $4,18^\circ C$ ), pri najnovšej simulácii (CCCM 1997 aj s aerosólom) je najväčší rast očakávaný v letnom období (v júli o  $1,93^\circ C$ , v auguste o  $1,87^\circ C$ , v septembri o  $1,98^\circ C$ ), kým v zimnom období je očakávaný najnižší rast (v decembri o  $0,86^\circ C$ , v januári o  $0,77^\circ C$ ). Získané hodnoty v tabulke a v grafe sú výsledkom zhladenia (podľa váženého priemeru s najbližšími mesačnými hodnotami), nakoľko nepredpokladáme výraznejšie zlomové zmeny v ročnom chode.

Teplotné scenáre pre Slovensko podľa jednotlivých mesiacov pri zosilnenom skleníkovom efekte (okolo roku 2050) na základe výsledkov najnovšieho modelu CCCM 1997 (aj s aerosólom) sú zhrnuté v tab. 2 a obr. 7.

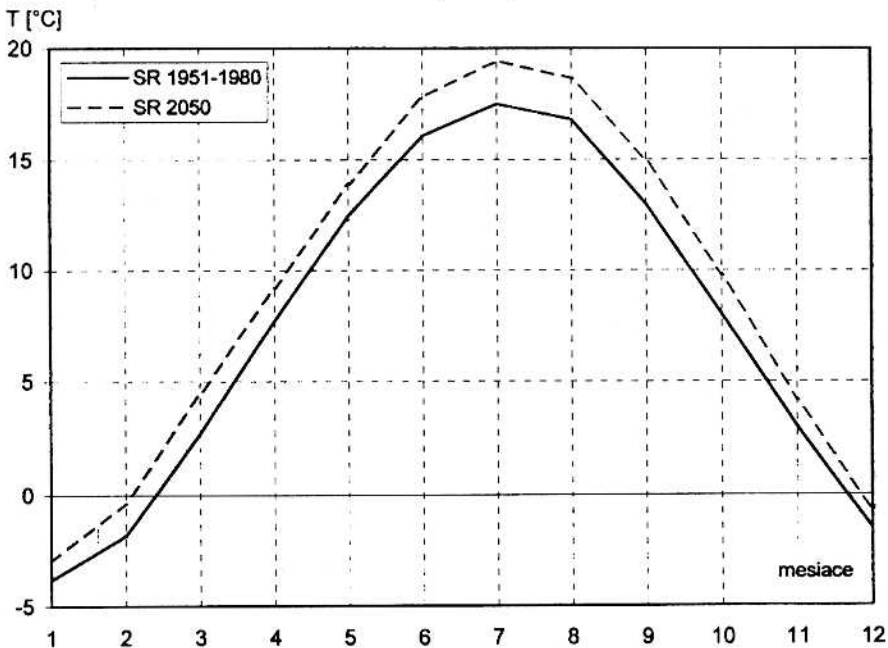
**Tab. 2. Priemerná mesačná teplota vzduchu na Slovensku skutočná v r. 1951-1980 a modelová podľa modelu CCCM 1997 (aj s aerosólom) pre  $2xCO_2$  (rok 2050)**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
SR (1951-1980)	-3,8	-1,8	2,7	7,7	12,5	16,1	17,5	16,8	13,0	8,0	3,0	-1,5	7,5
SR 2050	-2,9	-0,3	4,4	9,2	13,9	17,8	19,4	18,7	15,0	9,8	4,2	-0,7	9,0

Podrobnejšie výsledky z tohto najnovšieho kanadského modelu prináša práca Lapin a Melo (1999). V spomenutej práci sa postupovalo trochu odlišnejšou metódou (výpočty sa robili len na základe štyroch gridových bodov, pričom sa vylúčili najzápadnejšie ležiace body jeden a štyri kvôli horším individuálnym výsledkom pri porovnaní kontrolného obdobia).

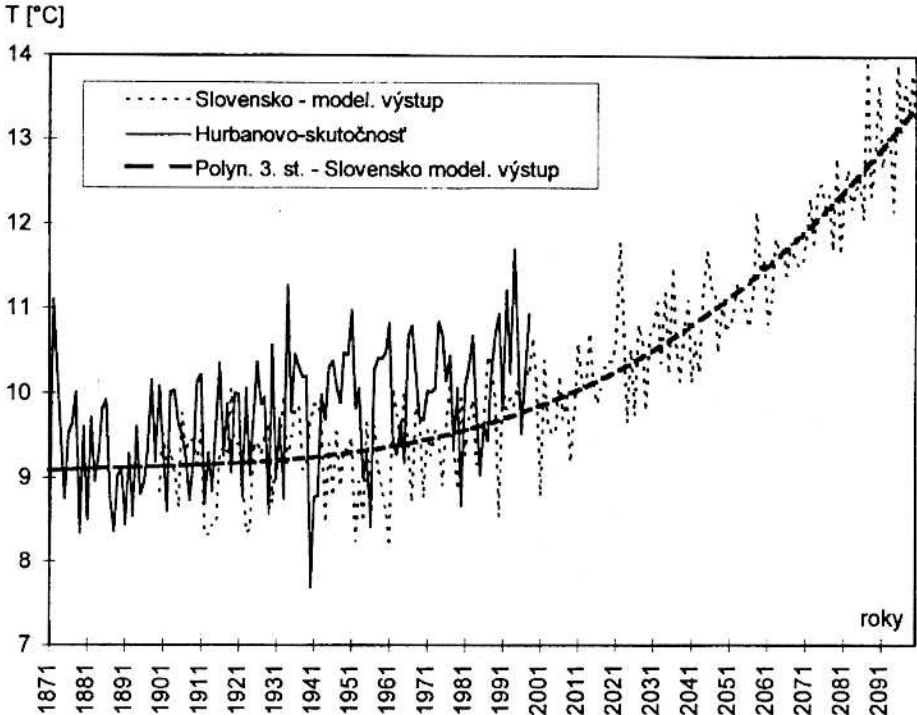


Obr. 6. Ročný chod zmien teploty vzduchu ( $2xCO_2 - 1xCO_2$ ) podľa jednotlivých kanadských modelov (CCCM).



Obr. 7. Priemerná mesačná teplota vzduchu na Slovensku skutočná v r. 1951-1980 a modelová podľa CCCM 1997 (aj s aerosólom) pre  $2xCO_2$  (rok 2050).

Na obr. 8 je znázornený chod priemernej ročnej teploty vzduchu na Slovensku v jednotlivých rokoch 1900-2100 podľa najnovšieho modelu CCCM 1997 (aj s aerosólom). Priebeh tejto krivky je zhladený polynómom 3. stupňa. Podľa priebehu tejto krivky je vidieť, že po miernom raste v prvej polovici sledovaného obdobia sa v druhej polovici predpokladá rýchlejšia rast teploty vzduchu na našom území. Kvôli porovnaniu je na tomto istom grafe zachytený aj priebeh pozorovanej priemernej ročnej teploty vzduchu v Hurbanove v jednotlivých rokoch 1871-1998.



Obr. 8. Priemerná ročná teplota vzduchu v Hurbanove v rokoch 1871-1998 a priemerná ročná teplota vzduchu na Slovensku v rokoch 1900-2100 na základe modelu CCCM 1997 (aj s aerosólom).

## ZÁVER

Záverom môžeme konštatovať, že aj napriek značnému orografickému zhladeniu v strednej Európe všetky kanadské modelové simulácie vystihujú pomerne veľmi dobre teplotné pomery na Slovensku, aj keď v priemere mierne nadhodnocujú priemerné mesačné teploty vzduchu.

Podľa modelu CCCM 1997 je zdvojnásobenie koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére určené na obdobie medzi rokmi 1980 a 2050. Za toto obdobie je pri predpoklade, že berieme do úvahy model CCCM 1997 aj s aerosólom, modelom simulovaný rast priemernej ročnej teploty vzduchu pre Slovensko o  $1,51^{\circ}\text{C}$ , čo je nižšia hodnota ako je rast globálnej teploty vzduchu podľa tohto istého modelu ( $1,9^{\circ}\text{C}$ ).

Keď porovnáme navzájom výsledky všetkých štyroch modelových simulácií, zistíme, že podľa najnovších modelov dosiahne rast priemernej ročnej teploty vzduchu na Slovensku pri klíme zosilneného skleníkového efektu atmosféry nižšie hodnoty ako sa pôvodne prvými modelmi očakávalo (pokles na 43,52 % pôvodnej hodnoty). Je to zapríčinené hlavne dokonalejším zabudovaním niektorých ďalších prvkov a väzieb klimatického systému do modelov (napr. svetového oceánu) a zahrnutím radiačného účinku aerosólov, ktoré sa pri raste skleníkového efektu atmosféry prejavujú negatívnou spätnou väzbou v systéme (zadržiavaním a pohlcovaním tepla v prípade oceánu, resp. priamo radiačným ochladzovaním klimatického systému v prípade aerosólov).

Kým pri prvých modelových simuláciách (CCCM 1989 a CCCM 1992) bol očakávaný najvyšší rast v zimných mesiacoch (február a marec), pri najnovšej simulácii (CCCM 1997 aj s aerosólom) je najväčší rast očakávaný v letnom období (júl, august, september) a v zimnom období je očakávaný najnižší rast (december, január).

Podľa najnovšej simulácie kanadského modelu (CCCM 1997 aj s uvažovaním vplyvu aerosólov) môžeme očakávať, že po doterajšom miernom raste priemernej ročnej teploty vzduchu na Slovensku v rokoch 1900-1998 sa predpokladá rýchlejši rast tejto teploty v najbližšom storočí (2000-2100).

V blízkej dobe chceme vypracovať scenáre aj pre ďalšie klimatické prvky podľa najnovšieho modelu CCCM 1997 a taktiež plánujeme vypracovať scenáre teploty vzduchu, atmosferických zrážok a ďalších klimatických prvkov podľa iných klimatických modelov, napr. modelu Goddardovho ústavu pre výskum vesmíru pri NASA v New Yorku (GISS).

## LITERATÚRA

- BOER, G. J., McFARLANE, N. A., LAZARE, M. (1992). Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-generation general circulation model. *Journal of Climate*, 5, 1045-1077.
- HRVOL, J. (1996). Modelové výpočty dôsledkov očakávaného oteplenia na zmeny celkovej bilancie žiarenia aktívneho povrchu a jej zložiek na Slovensku. In *Národný klimatický program SR*, 4. Bratislava (MŽP SR a SHMÚ), pp. 23-44.
- HOUGHTON, J.T., MEIRA FILHO, L.G., BRUCE, J., HOESUNG, L., CALLANDER, B.A., HAITES, E., HARRIS, N., MASKELL, K. (1994). *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. Cambridge (Cambridge University Press).
- HOUGHTON, J.T., MEIRA FILHO, L.G., CALLANDER, B.A., HARRIS, N., KATTENBERG, A., MASKELL, K. (1995). *Climate change 1995: the science of climate change*. Cambridge (WMO, UNEP, Cambridge University Press).
- WATSON, R. T., ZINYOWERA, M. C., MOSS, R. H., eds. (1997). *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. A special report of IPCC working group*, 2. Cambridge (Cambridge University Press).
- KALVOVÁ, J. (1991). Radiačne aktívny plyny v atmosfére a zmeny klimatu. In *Národný klimatický program ČSFR*, 3. Praha (ČHMÚ), pp. 1-73.
- LAPIN, M. (1997). Scenáre klimatickej zmeny v Slovenskej republike. In: Klimatické zmeny - Hydrológia a vodné hospodárstvo Slovenskej republiky. *Národný klimatický program SR*, 6. Bratislava (MŽP SR a SHMÚ), pp. 111-117.

- LAPIN, M., MELO, M. (1999). Impacts of Potential Climate Change on Water Resources, Climate Changes and Climate Change Scenarios in Slovakia. In *Proceedings of the International Symposium on New Approaches in Irrigation, Drainage and Flood Control Management*. Bratislava (VÚMKI, SEMISOFT), CD-ROM, record 4/6.
- LAPIN, M., NIEPLOVÁ, E., FAŠKO, P. (1995). Regionálne scenáre zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku. *Národný klimatický program Slovenskej republiky*, 3. Bratislava (MŽP SR a SHMÚ), pp. 17 - 57.
- LAPIN, M., ZÁVODSKÝ, D., MAJERČÁKOVÁ, O., MINĎÁŠ, J., ŠPÁNIK, F. (1996). Preliminary results of vulnerability and adaptation assessment for Slovakia. In *Vulnerability and Adaptation to Climate Change*. U.S. Country Studies Program. Dordrecht (Kluwer), pp. 295-312.
- LAPIN, M., ZÁVODSKÝ, D., MAJERČÁKOVÁ, O., MINĎÁŠ, 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, Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky a Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava.
- MAREČKOVÁ, K., LAPIN, M., MINÁRIK, B., MOJÍK, I., ZÁVODSKÝ, I., ZÁVODSKÝ, D., ZUZULA, I. (1997). *Country study Slovakia*. Final report, U.S. country studies program, Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky a Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava.
- McFARLANE, N. A., BOER, G. J., BLANCHET, J.-P., LAZARE, M. (1992). The Canadian climate centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate. *Journal of Climate*, 5, 1013-1044.
- MELO, M. (1996). Klimatické scenáre. In *Národný klimatický program SR*, 4. Bratislava (MŽP SR a SHMÚ), pp. 5-21.
- MELO, M. (1997). *Klimatické modely a zosilnený skleníkový efekt atmosféry*. Záverečná správa NKP SR, Slovenský hydrometeorologický ústav a Katedra meteorológie a klimatológie MFF UK, Bratislava.
- MELO, M., SLABÝ, J. (1996). Global solar radiation under the climate of strengthened greenhouse effect in Sliac. In Hortalová, T., ed. *Meteorological Processes in the Boundary Layer of the Atmosphere. Proceedings of the International Conference in Stará Lesná*. Bratislava (GI SAS and SMS), pp. 29-34.
- NIEPLOVÁ, E., FAŠKO, P., LAPIN, M. (1997). Regionálne scenáre vybraných teplotných a zrážkových charakteristík na Slovensku. In *Príspevok ku scenárom klimatickej zmeny na Slovensku. Národný klimatický program SR*, 7. Bratislava (MŽP SR a SHMÚ), pp. 7-45.
- TOMLAIN, J. (1996). Modelové výpočty zmeny klímy na zmeny potenciálnej a skutočnej evapotranspirácie na Slovensku. *Národný klimatický program SR*, 4. Bratislava (MŽP SR a SHMÚ), pp. 47-74.
- TRENBERTH, K. E., ed. (1992). *Climate system modelling*. Cambridge (Cambridge University Press).

*Marián Melo, Milan Lapin*

## TEMPERATURE SCENARIOS FOR SLOVAKIA BASED ON CANADIAN CLIMATE MODELS

The important source of information about behaviour of climatic system under changed conditions are climate models. Climate models are continuously being improved (improved representa-

tion of oceans and another landscape components, physical and chemical processes). The aim of this contribution is to summarise development of temperature scenarios for Slovakia on the basis of 4 Canadian model outputs. In this paper air temperature model outputs from Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis in Victoria (CCCM 1989, CCCM 1992, CCCM 1997, CCCM 1997 (+ aerosols)) and measured monthly temperature means in Slovakia 1951-1980 (in case Hurbanovo 1900-1998) are used.

In the first part of this contribution the validation of these 4 model outputs for period 1951-1980 is done. In case of the most recent model (coupled GCM 1st generation with increasing greenhouse gases and aerosol forcing) validation on the basis of Hurbanovo data series for the period 1900 - 1998 is carried out too. In the second part the scenarios of monthly mean air temperature for Slovakia under the conditions of the greenhouse gases concentration doubling in the atmosphere (in the year 2050) are elaborated.

Modelled annual mean surface air temperature increase on the territory of Slovakia reaches lower value than the modelled global increase in 2050. The most recent temperature scenarios for the strengthened greenhouse effect on the Slovak territory reach lower values than the first scenarios. It is caused partly by the inclusion of aerosols into the model and partly due to other reasons (ocean's role in sequestering heat). This warming is the highest in the summer period and the least in the winter, while in earlier model experiments the warming it was the highest in the winter period. In the next century more intensive air temperature growth in Slovakia is expected.

- Fig. 1. Annual course of monthly air temperature means and CCCM model outputs for Slovakia.  
 Fig. 2. Annual temperature means in 1900-1998 at Hurbanovo and CCCM model outputs downscaling for Hurbanovo.  
 Fig. 3. January temperature means at Hurbanovo and CCCM model outputs downscaling for Hurbanovo in 1900-1998.  
 Fig. 4. July temperature means at Hurbanovo and CCCM model outputs downscaling for Hurbanovo in 1900-1998.  
 Fig. 5. Measured and modelled annual temperature at Hurbanovo in 1900-1998 (7-year moving averages).  
 Fig. 6. Annual course of differences of air temperature means ( $2xCO_2 - 1xCO_2$ ) based on Canadian models (CCCM).  
 Fig. 7. Monthly temperature means in Slovakia - measured in 1951-1980 and based on CCCM outputs in 2050.  
 Fig. 8. Annual air temperature means at Hurbanovo in 1871-1998 and mean temperature in Slovakia based on CCCM 1997 outputs (+aerosols).  
 Tab. 1. Annual course of differences of air temperature means ( $2xCO_2 - 1xCO_2$ ) based on Canadian models (CCCM).  
 Tab. 2. Monthly temperature means in Slovakia - measured in 1951-1980 and based on CCCM outputs in 2050.

Translated by the authors