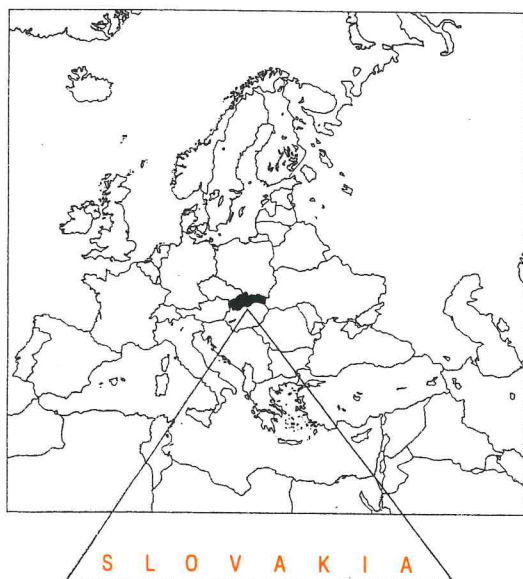




NKP
8/00

SCENÁRE KLIMATICKEJ ZMENY A IMPAKTY CLIMATE CHANGE SCENARIOS AND IMPACTS

- *Nové klimatické scenáre pre Slovensko na základe prepojených GCMs*
(New Climate Change Scenarios for Slovakia Based on Coupled GCMs)
- *Súhrnná správa Národného klimatického programu Českej republiky*
(Report on the National Climate Program of the Czech Republic)
- *Možné dôsledky zmeny klímy na lesnú drevinu smrek na Slovensku*
(Possible Climate Change Impacts on Norway Spruce in Slovakia)
- *Trendy vegetačných fáz viniča hroznorodého a smreka obyčajného*
(Trends in the Grapevine and Norway Spruce Phenological Phases)
- *Vplyv klimatickej zmeny na priebeh odtoku v malom horskom povodí*
(Impact of Climate Change on Runoff in a Small Mountain Catchment)

***NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY***

***NATIONAL CLIMATE PROGRAM
OF THE SLOVAK REPUBLIC***

**NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY**

Zväzok 8

BRATISLAVA 2000

© MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SR
SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

SLOVAK MINISTRY OF THE ENVIRONMENT
SLOVAK HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE

2000

OBSAH

<i>Lapin, M., Melo, M., Damborská, I., Gera, M., Faško, P.: Nové scenáre klimatickej zmeny pre Slovensko na báze výstupov prepojených modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (lektoroval: Závodský, D., SHMÚ).....</i>	<i>5</i>
<i>Kalvová, J., Květoň, V., Nemešová, I., Sobišek, B., a kol.: Souhrnná zpráva Národního klimatického programu ČR o přípravné fázi pravidelného sledování změn klimatu a jejích dopadů (lektoroval: Lapin, M., KMK FMFI UK).....</i>	<i>35</i>
<i>Mindáš, J., Škvarenina, J., Střelcová, K., Priwitzer, T.: Očakávané zmeny klímy a možné dôsledky na lesnú drevinu smrek obyčajný (Picea Abies L. Karst.) na Slovensku (lektoroval: Lapin, M., KMK FMFI UK).....</i>	<i>55</i>
<i>Braslavská, O.: Tendencie a trendy vo vegetačnom období viniča hroznorodého v lokalite Dolné Plachtince v rokoch 1971-2000 (lektoroval: Šťastný, P.: SHMÚ)...</i>	<i>69</i>
<i>Luknárová, V.: Nástupy fenologických fáz smreka obyčajného a zmeny klímy (lektorovala: Braslavská, O., SHMÚ).....</i>	<i>79</i>
<i>Kostka, Z., Holko, L.: Vplyv klimatickej zmeny na priebeh odtoku v malom horskom povodí (lektorovala: Hlavčová, K., KVHK SvF STU).....</i>	<i>91</i>

CONTENTS

English Abstracts and Summaries are at the end of Papers

<i>Lapin, M., Melo, M., Damborská, I., Gera, M., Faško, P.: New Scenarios of Climate Change for Slovakia Based on the Coupled General Circulation Models Output (Reviewed by: Závodský, D., SHMI)</i>	5
<i>Kalvová, J., Květoň, V., Nemešová, I., Sobišek, B., et al.: Report on the National Climate Program of the Czech Republic on the Arrangement Phase of Regular Monitoring of Climate Change and its Impacts (Reviewed by: Lapin, M., KMK FMFI UK)</i>	35
<i>Mindáš, J., Škvarenina, J., Střelcová, K., Priwitzer, T.: Expected Climate Changes and Possible Impacts on Norway Spruce (Picea Abies L. Karst.) in Slovakia (Reviewed by: Lapin, M., KMK FMFI UK)</i>	55
<i>Braslavská, O.: Tendencies and Trends in the Grapevine Growing Season at the Locality Dolné Plachtince in 1971-2000 (Reviewed by: Šťastný, P., SHMI)</i>	69
<i>Luknárová, V.: Onset of Norway Spruce Phenological Phases and Climate Change (Reviewed by: Braslavská, O., SHMI)</i>	79
<i>Kostka, Z, Holko, L.: Impacts of Climate Change on Runoff in a Small Mountain Catchment (Reviewed by: Hlavčová, K., KVHK SvF STU)</i>	91

NOVÉ SCENÁRE KLIMATICKEJ ZMENY PRE SLOVENSKO NA BÁZE VÝSTUPOV PREPOJENÝCH MODELOV VŠEOBECNEJ CIRKULÁCIE ATMOSFÉRY

^(1,2)Lapin, M., ⁽¹⁾Melo, M., ⁽¹⁾Damborská, I., ⁽¹⁾Gera, M., ⁽²⁾Faško, P.,
⁽¹⁾KMK FMFI UK, Bratislava a ⁽²⁾SHMÚ, Bratislava

1. ÚVOD

Na Druhej svetovej klimatickej konferencii v Ženeve (SWCC, 1990) boli po prvý krát širokej verejnosti prezentované kompletne scenáre možného vývoja klímy Zeme v dôsledku antropogénne podmieneného rastu skleníkového efektu atmosféry. Tieto scenáre, a aj súvislosti tzv. "zmeny klímy", vychádzali z prvých odhadov a modelových výpočtov Medzivládneho panelu pre klimatickú zmenu (IPCC) založeného v roku 1988. Pomerne v krátkom čase boli spracované nové odhady IPCC, prezentované predbežne už v roku 1992 ako IS92 scenáre, neskôr oficiálne zverejnené v Druhej správe IPCC v rokoch 1994 a 1995. Teraz je pripravená na vydanie 3. správa IPCC (TAR) s detailnejšou analýzou emisných a iných scenárov. IS92 emisné scenáre vychádzali z veľmi podrobnej analýzy možného socio-ekonomického vývoja ľudského spoločenstva v globálnom rozmere, pričom vývoj svetovej populácie, výroba a spotreba energie hrali oprávnené najvýznamnejšiu úlohu. Vyplývalo to najmä zo skutočnosti, že vývoj koncentrácie CO₂ v atmosfére Zeme môže dominantne ovplyvniť aj vývoj globálneho oteplenia prízemnej vrstvy atmosféry. V IS92 scenároch globálneho oteplenia sa po prvýkrát detailne brali do úvahy aj efekty spojené so zmenou koncentrácie jednotlivých druhov antropogénnych aerosólov v atmosfére.

Na emisné scenáre IS92 nadväzoval vývoj oveľa zložitejších modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs) s variantným riešením výstupov. Tento vývoj bol zavŕšený po roku 1996 doteraz najlepšie teoreticky prepracovanými modelmi GCMs s tzv. prepojeným systémom atmosférickej a oceánickej cirkulácie. V tejto štúdii predkladáme odbornej verejnosti na Slovensku regionálnu modifikáciu výstupov z dvoch takýchto prepojených GCMs (CCCM z Kanadského strediska pre modelovanie klímy a GISS z Goddardovho ústavu pre vesmírne štúdie v USA (Goddard Institute for Space Studies)). V prezentovanej modifikácii sme použili rozsiahlu údajovú základňu z meraní v sieti klimatologických a zrážkomerných staníc SHMÚ z obdobia 1901-2000, pričom väčšina z týchto údajov prešla testami časovej homogenity klimatických radov. Možnosť použitia kontrolného obdobia (control period) v trvaní 90 rokov (1901-90) významne znížila vplyv variability krátkodobých (30-ročných) klimatických normálov na konečné scenáre klimatickej zmeny. Regionálna modifikácia výstupov týchto najnovších modelov GCMs je stále iba v začiatkoch, využili sme iba výstupy 5 premenných (teplota vzduchu, úhrny zrážok, globálne žiarenie, merná vlhkosť vzduchu na hladine 850 hPa a pri zemskom povrchu, všetko ako mesačné priemery).

V rokoch 1995 až 1997 prezentoval kolektív riešiteľov projektov Country Study Slovakia a NKP SR regionálnu modifikáciu scenárov klimatickej zmeny založenú na výstupoch modelov GCMs poskytutých v rámci participácie na riešení projektu US Country Studies z riadiaceho centra medzinárodného projektu v USA. Z výstupov 5 modelov (CCCM, GISS, GFD3, GFD01 a UK89) boli pre Slovensko vybraté prvé 3 na základe najlepšej zhody kontrolného obdobia s obdobím 1951-1980 (baseline scenario). Napriek tomu sa aj vybrané modely vyznačovali značnými odchýlkami ich kontrolnej klímy s empirickými hodnotami klímy z obdobia 1951-1980. Výstupy týchto modelov boli z rokov 1989 až 1994. Ako scenáre zmeny klímy sa pre Slovensko použili porovnania kontrolnej klímy s 30-ročnými časovými horizontami so stredom v rokoch 2010, 2030 a 2075. Pre teplotu vzduchu a globálne žiarenie bol prijatý jeden scenár pre celé Slovensko, pre atmosférické zrážky boli scenáre zvlášť pre sever a zvyšok Slovenska. Ročné scenáre rastu teploty vzduchu boli 3,4 až 4,3 °C a zrážok 0% až 16% do časového horizontu 2075 (Lapin et al., 1995, 1997, Szolgay et al, 1999). Podobne postupovali aj iné krajiny v str. Európe.

Modely, ktoré sme vybrali pre túto štúdiu NKP SR sa vyznačujú niekoľkými prednosťami. V prvom rade predstavujú kontinuitu s modelmi použitými v rokoch 1995-1997. Ďalej je to skutočnosť, že predstavujú najnovšie výsledky modelovania klímy s výstupmi z rokov 1998 a 1999. Nie zanedbateľná je aj ich variabilnosť - verzie bez vplyvu a s vplyvom zmenenej koncentrácie aerosólov. V oboch modeloch je zabudovaný rast koncentrácie CO₂ o 1% ročne a obidva modely majú 4 uzlové body výstupov približne na tom istom mieste v okolí Slovenska. Kontrolná klíma obidvoch modelov pomerne presne reprezentuje pozorovanú klímu v strednej Európe v období 1901-1990, čo je tiež veľký pokrok oproti predchádzajúcim verziám GCMs. Ďalším veľkým pokrokom týchto modelov je možnosť regionálnej modifikácie niektorých premenných ako časových radov mesačných hodnôt so vzájomným fyzikálnym prepojením.

2. RADIAČNÉ ZOSILNENIE (RADIATIVE FORCING)

2.1 Radiačná bilancia Zeme

Bilancia slnečného žiarenia v atmosfére a na Zemi ako celku je ovplyvnená viacerými faktormi, výsledkom ktorých je taký stav, že približne 30% zo žiarenia prichádzajúceho k Zemi od Slnka sa odrazí naspäť do kozmického priestoru. Túto hodnotu môžeme považovať za priemerné planetárne albedo Zeme, pričom sa na ňom najväčšou mierou podieľa oblačnosť, snehová pokrývka a ľadovce. Zvyšných 70% slnečnej radiácie sa transformuje v atmosfére Zeme a na zemskom povrchu, a potom opustí Zem ako dlhovlnné žiarenie tiež do kozmického priestoru. Uvedený pomer 30%:70% sa pravdepodobne v Holocéne (za posledných 10 000 rokov, teda od konca poslednej ľadovej doby) podstatne nezmenil. Očakávaná klimatická zmena môže ovplyvniť aj planetárne albedo zmenou celkovej plochy snehovej pokrývky, horských a ľadovcov ale najmä zmenou plochy a planetárneho rozloženia oblačnosti. Planetárne albedo môže významne ovplyvniť aj zmenená koncentrácia niektorých aerosólov, predovšetkým v horných vrstvách troposféry a v stratosfére (Podrobnejšie na: <http://www.suh.sk/obs/slnsem/lapin/lapin.htm>).

V atmosfére Zeme sa časť slnečného žiarenia prichádzajúceho od Slnka absorbuje (pohlcuje) radiačne aktívnymi plynmi, pričom krátkovlnné žiarenie v rozsahu spektra od 0,29 do 1 μm je v čistej a suchej atmosfére pohlcované iba nepatrne. Úplne je však pohltené tvrdé UV žiarenie s kratšou vlnovou dĺžkou ako 0,29 μm , najmä stratosférickým ozónom nachádzajúcim sa vo výške okolo 25 km. Okrem toho krátkovlnné žiarenie významne absorbuje oblačnosť a atmosférické aerosóly.

Radiačne aktívne plyny v atmosfére absorbujú aj dlhovlnné vyžarovanie zemského povrchu a v závislosti od množstva absorbovaného žiarenia sa ohrievajú a produkujú spätné dlhovlnné žiarenie aj smerom k zemskému povrchu. Z hľadiska celkovej absorpcie je najvýznamnejším radiačne aktívnym plynom v atmosfére vodná para s intenzívnymi absorpčnými pásmi pre vlnové dĺžky IČ žiarenia pre $\lambda = 5$ až 8 μm a pre $\lambda > 17$ μm . Vodná para iba nepatrne absorbuje dlhovlnné vyžarovanie zemského povrchu v oblasti spektra $\lambda = 8,5$ až 12,0 μm , ktoré nazývame "atmosférické okno". Je zaujímavé, že práve pre vlnové dĺžky atmosférického okna je maximum hustoty toku vyžarovania zemského povrchu pri $T = 313$ K (40 °C, $\lambda = 9$ μm) až pri $T = 233$ K (-40 °C, $\lambda = 12$ μm). Je zrejmé, že funkcia vodnej pary ako radiačne aktívneho plynu pre dlhovlnnú časť spektra je najvýznamnejšia v ekvatoriálnom klimatickom pásme a v oblastiach s vysokou absolútnou vlhkosťou a (na Sibíri v zime, v polárnych a studených suchých kontinentálnych oblastiach Zeme je v prízemnej vrstve $a < 0,001$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, vo vlhkých ekvatoriálnych oblastiach môže byť $a > 0,040$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

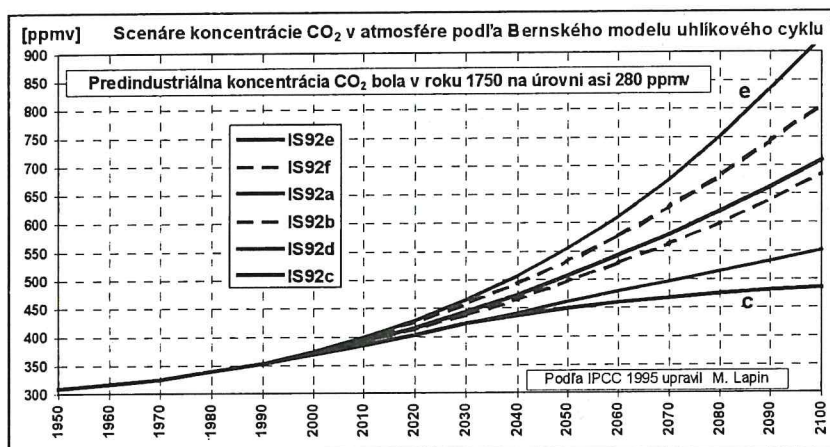
Koncentrácia vodnej pary v atmosfére Zeme sa v priemere mení iba nepatrne a dá sa povedať, že závisí predovšetkým od priemernej teploty atmosféry do nadmorskej výšky 1,5 km, kde je asi 50% celkovej vodnej pary v atmosfére Zeme. Scenáre klimatickej zmeny predpokladajú pre túto vrstvu atmosféry rast teploty o 1,5 - 6 °C do roku 2100 (pričom 6 °C je pesimistický scenár, ak sa neprijmú žiadne opatrenia). To znamená, že vzrastie aj koncentrácia H_2O v atmosfére, pri raste T o 2 °C asi o 10% (v SR až o 25% pri raste T o 3 °C), a tým aj účinok vodnej pary na celkovom skleníkovom efekte atmosféry vzrastie.

Ostatné skleníkové plyny sa na celkovom skleníkovom efekte atmosféry podieľajú asi 30 percentami, pričom pri CO_2 (oxid uhličitý) je to asi 25%. Zdôrazniť je potrebné skutočnosť, že na jednotlivých konkrétnych miestach Zeme môžu okamžité (ale aj priemerné) hodnoty vplyvu radiačne aktívnych plynov nadobúdať značné odchýlky. Na klimatických podmienkach danej lokality sa to prejavuje najmä okamžitými alebo priemernými hodnotami dennej amplitúdy teploty vzduchu. Ak je pri rovnakom dennom chode bilancie krátkovlnnej časti spektra žiarenia rozdielna denná amplitúda teploty vzduchu, tak za to "zodpovedá" predovšetkým rozdielna hodnota vplyvu radiačne aktívnych plynov v atmosfére nad lokalitou na bilanciou dlhovlnnej časti spektra žiarenia. Zosilňovanie skleníkového efektu atmosféry sa posudzuje väčšinou globálne, teda v priemere na celej Zemi. Modelové výpočty však potvrdzujú, že dôsledky zosilnenia skleníkového efektu atmosféry na raste ročných priemerov teploty vzduchu sú najväčšie práve na tých miestach, kde je nízka absolútna vlhkosť vzduchu (sever kontinentálnej časti Ázie).

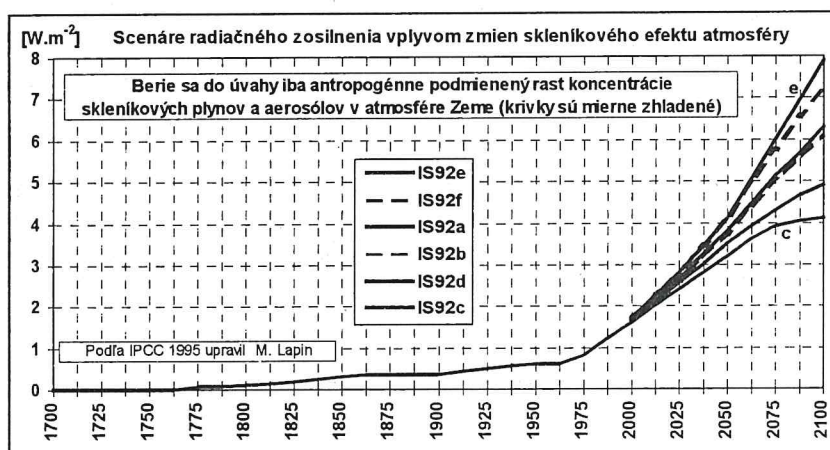
2.2 Scenáre radiačného zosilnenia do roku 2100

V roku 1992 sa pripravili a v roku 1999 upresnili tzv. IPCC IS92 scenáre (najpravdepodobnejšie a, b scenáre, okrajové c, e scenáre a stredne extrémne d, f scenáre). Predpokladá sa pri nich sumárny efekt radiačného zosilnenia v roku 2100 o 4,1 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ pri IS92c scenári až po 8,0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, pri IS92e scenári (obr. 2). Uvedený vývoj súvisí s emisiou skleníkových plynov a aerosólov do atmosféry nad prirodzenú

úroveň a s tým súvisiacim rastom koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére (obr. 1). Jednotlivé skleníkové plyny a aerosóly majú rozdielnu mernú účinnosť pri ovplyvňovaní radiačných podmienok v rôznych častiach atmosféry. Do roku 2100 sa predpokladá rast sumárneho radiačného zosilnenia skleníkových plynov a radiačného zoslabenia aerosólov z asi $1,25 \text{ W.m}^{-2}$ v roku 1992 na asi $6,25 \text{ W.m}^{-2}$ (podľa scenára IPCC IS92a). Pri všetkých aerosóloch sa predpokladá malý rast sumárneho záporného zosilnenia (antiskleníkový efekt), spolu len asi $0,5 \text{ W.m}^{-2}$, vrátane nepriamych efektov.



Obr. 1 Vývoj koncentrácie CO_2 v atmosfére Zeme v období 1950-1995 a IPCC scenáre možného vývoja do roku 2100 (scenár IS92a je najpravdepodobnejší, IS92e najpesimistickejší a IS92c najoptimistickejší).

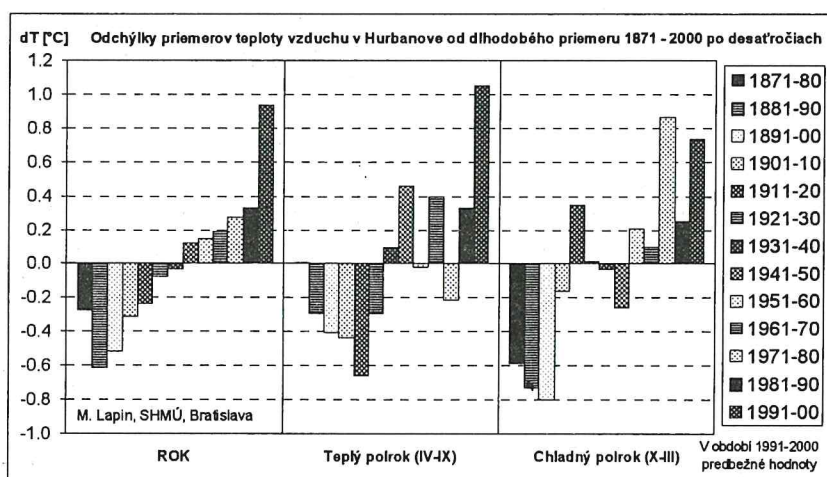


Obr. 2 Vývoj radiačného zosilnenia vplyvom antropogénne podmieneného rastu skleníkového efektu atmosféry od roku 1700 a IPCC scenáre možného vývoja do roku 2100.

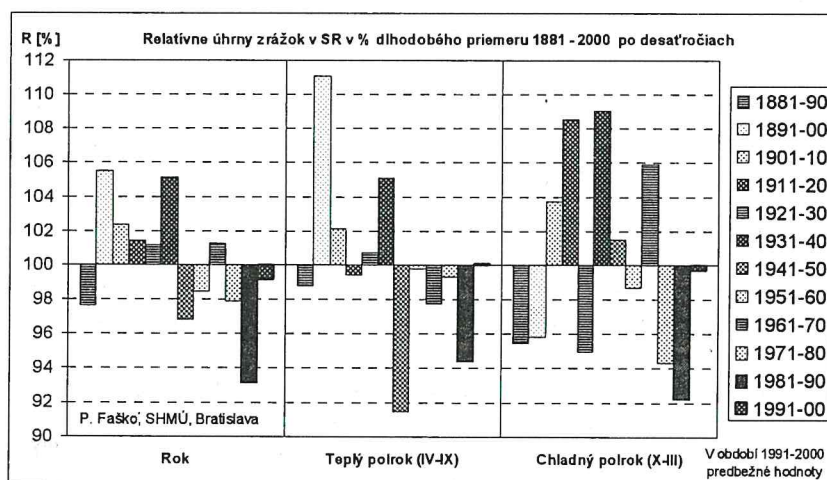
V súvislosti s nevelkou ochotou redukovať emisie skleníkových plynov zo strany rozhodujúcich krajín (30 krajín OECD) sa dnes už pripúšťa, že vývoj pôjde skôr podľa pesimistickejšieho scenára IS92f, čo je približne 1% rastu koncentrácie CO_2 v atmosfére ročne až do roku 2100. To by znamenalo do roku 2100 radiačné zosilnenie približne na úroveň $7,2 \text{ W.m}^{-2}$ a stav $2\times\text{CO}_2$ približne v roku 2050. Preto je veľmi dôležité, že aký emisný scenár a aký scenár výslednej koncentrácie jednotlivých skleníkových plynov a aerosólov sa použije pri modelových výpočtoch dôsledkov rastu skleníkového efektu atmosféry. Často publikovaný veľký interval možného globálneho oteplenia do roku 2100 (o $1,5$ až $3,5$ $^{\circ}\text{C}$, alebo aj o $1,5$ až 6 $^{\circ}\text{C}$) ide práve na vrub širokého rozsahu emisných scenárov. Svetové spoločenstvo sa ešte nerozhodlo, že ako bude modifikovať svoje správanie v 21. storočí, preto je potrebné brať do úvahy všetky možné alternatívy. Podľa výsledkov rokovania COP v Haagu (XI. 2000) sa blíži ľudstvo k pesimistickému scenáru IS92f s možnými odchýlkami k ešte horšiemu scenáru IS92e. V takejto situácii je zrejmé, že je potrebné brať do úvahy viaceré scenáre v intervale najpravdepodobnejších variantov vývoja správania svetového spoločenstva ľudí. Za veľmi nepravdepodobné scenáre je možné považovať IS92c a asi aj IS92d, teda pokles globálnych emisií CO_2 po roku 2040 na strane jednej a žiadne účinné opatrenia na redukcii emisií skleníkových plynov až do roku 2100 na strane druhej.

3. MOŽNÉ DÔSLEDKY RADIAČNÉHO ZOSILNENIA

Pod pojmom "zmena klímy" rozumieme iba tie zmeny v klimatických pomeroch, ktoré súvisia s antropogénne podmieneným rastom skleníkového efektu atmosféry od začiatku priemyselnej revolúcie (asi 1750 r. n. l.). V konečnom dôsledku bude výsledná klíma zložená z prirodzených zmien, kolísania a premenlivosti klímy a "zmeny klímy" zapríčinené iba antropogénne podmieneným rastom skleníkového efektu atmosféry. Budúce klimatické podmienky tak môžu nadobudnúť podstatne odlišné hodnoty priemerov a variability klimatických prvkov oproti doterajšiemu pozorovaniu, no môžu sa vyskytnúť aj nečakané extrémny. Ako príklad uvádzame doterajší vývoj 10-ročného priemeru teploty vzduchu (T) v Hurbanove a 10-ročných územných úhrnov zrážok (R) na Slovensku (obr.3 a 4). Je zrejmé, že aj jednotlivé 10-ročné výrazné výkyvy T a R môžu byť väčšie ako očakávaná "klimatická zmena" týchto prvkov do roku 2100, nehovoriac už o ročných hodnotách. Pri pohľade na 10-ročné priemery teploty vzduchu a celoslovenských úhrnov zrážok sa ukazuje, že posledných 10 rokov (1991-2000) môžeme na Slovensku úspešne považovať za modelový príklad scenára aspoň pre obdobie 2026-2035.



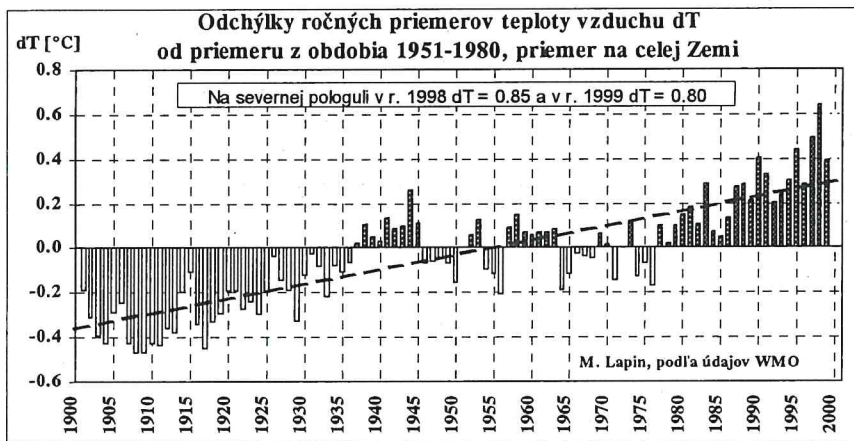
Obr. 3 Odchýlky 10-ročných priemerov teploty vzduchu v Hurbanove od celkového priemeru za obdobie 1871-2000 (teplý polrok je pre sezónu apríl až september a chladný polrok pre sezónu október minulého roka až marec daného roka; údaje pre Hurbanovo v odchýlkach dobre reprezentujú pomery na celom Slovensku a približne aj v oblasti 4 najbližších uzlových bodov modelov CCCM a GISS).



Obr. 4 Relatívne hodnoty 10-ročných priemerov územných úhrnov zrážok na Slovensku (z 203 staníc) v % v porovnaní s celkovým priemerom za obdobie 1881-2000 (teplý polrok je pre sezónu apríl až september a chladný polrok pre sezónu október minulého roka až marec daného roka; údaje dobre reprezentujú pomery na celom Slovensku a aj v oblasti 4 najbližších uzlových bodov modelov CCCM a GISS strednej Európe).

Okrem skleníkových plynov existujú v atmosfére prirodzene voľne sa vznášajúce pevné a kvapalné častice (aerosóly iné ako kondenzačné produkty H_2O) a aj ľudstvo emituje do atmosféry aerosóly, z ktorých niektoré spôsobujú pokles intenzity skleníkového efektu atmosféry. Mechanizmus poklesu intenzity skleníkového efektu atmosféry je daný tým, že niektoré aerosóly zvyšujú planetárne albedo Zeme, čiže odrážajú naspäť do kozmického priestoru prichádzajúce slnečné žiarenie podobne ako oblačnosť.

Globálny potenciál oteplenia (GWP) sa vypočítava ako sumárny kladný alebo záporný príspevok skleníkových plynov a aerosólov ku globálnemu otepleniu v jednotkách účinku CO_2 a radiačné zosilnenie v jednotkách hustoty toku priameho slnečného žiarenia. Napríklad radiačné zosilnenie CO_2 bolo v roku 1992 oproti predindustriálnemu obdobiu asi $1,5 \text{ W.m}^{-2}$. Priamy záporný vplyv antropogénne podmienených aerosólov sa odhaduje na $0,5 \text{ W.m}^{-2}$ no nepriamy záporný vplyv je zatiaľ neistý. GWP sa môže pri jednotlivých skleníkových plynach časom meniť v dôsledku rozdielného priemerného zotrvania v atmosfére, preto sa uvádza GWP k rôznym časovým horizontom, napríklad 20, 100 a 500 rokov.



Obr. 5. Odchýlky globálnych priemerov (na celej Zemi) teploty vzduchu od dlhodobého priemeru z obdobia 1951-1980 a lineárny trend (WMO, 2000).

Modelové výpočty naznačujú, že výsledkom rastu skleníkového efektu atmosféry bude postupné zvyšovanie globálneho priemeru teploty vzduchu v prízemnej atmosfére Zeme v priemere o $1-3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do roku 2100 oproti horizontu roku 2000 (niektoré odhady dávajú do roku 2100 oteplenie o $1,5$ až $6,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ oproti stavu $1xCO_2$, ktorý bol okolo 280 ppmv do roku 1800) a tento rast bude určite pokračovať aj v budúcich storočiach. Vzhľadom na to, že už v súčasnosti predstavuje rast skleníkového efektu atmosféry asi $1,9 \text{ W.m}^{-2}$ v jednotke hustoty toku slnečného žiarenia, mal by sa tento efekt už začať prejavovať ako globálne oteplenie. Na obr.5 uvádzame vývoj ročných priemerov globálnej teploty vzduchu od roku 1901, teda vážených priemerov teploty vzduchu vypočítaných zvláštnou metódou z niekoľkých stoviek kvalitných klimatologických staníc. Počet takýchto staníc bol pred rokom 1900 oveľa menší, no je možná pomerne spoľahlivá rekonštrukcia homogénneho radu globálnej teploty vzduchu od roku 1861. Napriek určitým malým nepresnostiam je zrejmé, že globálna teplota vzduchu vzrástla od začiatku storočia asi o $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a na severnej pologuli až asi o $1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Zmeny globálnej teploty vzduchu sú približne v súlade s vývojom prirodzeného radiačného zosilnenia iba do začiatku 20. storočia.

4. VÝVOJ MODELOVANIA KLÍMY

Najvhodnejším prostriedkom na štúdium klimatického systému a jeho modelovanie sú klimatické modely. Klimatické modely sú súbory fyzikálnych a chemických vzťahov vyjadrujúcich väzby medzi zložkami klimatického systému, reprezentované vo forme matematických rovníc (Meteorologický slovník výkladový terminologický, 1993). V súčasnosti existuje celý rad modelov od jednoduchých, ktoré simulujú len určitý proces v atmosfére až po zložité modely, ktoré simulujú množstvo procesov prebiehajúcich v celom klimatickom systéme. Atmosferické zložky klimatických modelov boli v podstate prevzaté z numerických predpovedných modelov počasia. Klimatické modely však okrem modelu atmosféry zahŕňujú aj ďalšie zložky klimatického systému, ako sú oceány, krajinný povrch, ľadovce a snehové polia, biosféru,...

Pokusy matematicky modelovať atmosféru Zeme a jej odozvu na prípadné vnútorné alebo vonkajšie zmenené podmienky sú staré najmenej jedno storočie. Jedným z prvých matematických "modelov" kli-

matickej zmeny bol Arrheniusov povrchový energeticko-bilančný model v roku 1896, ktorým vyvodzuje možné 2 °C oteplenie pri zdvojnásobení CO₂ v atmosfére (Trenberth, 1992). Výraznejší pokrok pri matematickom modelovaní atmosféry bol dosiahnutý až s rozvojom výpočtovej techniky. V 50-tych rokoch boli vypracované numerické riešenia zjednodušených verzií atmosférických pohybových rovníc v Geofyzikálnom laboratóriu dynamiky tekutín (GFDL) na Princetonskej univerzite (New Jersey, USA). Kým v tomto období bol hlavný záujem sústredený na modelovanie atmosféry (fyziku atmosféry), od 70-tych rokov sa pozornosť postupne sústreďuje na celý klimatický systém. V prvej polovici 70-tych rokov sa do modelov dostáva krajinný povrch a hydrológia. Koncom 70-tych sa už uvažuje s pôsobením najvyššej povrchovej vrstvy oceánu a kryosféry. V tejto dobe sa oceán podobal pevnému zemskému povrchu s neobmedzenou zásobou vody na výpar, pritom sa nebrala do úvahy jeho tepelná kapacita, ani oceánické prúdenie. V nasledujúcich rokoch sa oceán zdokonaľuje k podobe 50-100 m hlbkej premiešavajúcej vrstvy. V polovici 80-tych rokov sa do popredia dostáva definovanie úlohy oblakov v klimatickom systéme. Úplne vyriešenie tejto záležitosti sa však v plnej miere nepodarilo ani do súčasnosti.

Koncom 80-tych a začiatkom 90-tych rokov nastal výrazný posun pri modelovaní oceánickej časti klimatického systému, kedy sa podarilo vypracovať prvé samostatné modely oceánickej cirkulácie (so zahrnutím aj vplyvu hlbinných vôd oceánu a ich tokov). Vzájomným prepojením modelu atmosféry a oceánu vzniká nová generácia klimatických modelov, a to prepojené oceánicko-atmosférické modely (prepojené (coupled) GCMs). Oceán má významnú úlohu pri formovaní klímy. Zmierňuje náhle klimatické zmeny a pôsobí so značnou tepelnou a látkovou zotrvačnosťou. Je veľkým rezervoárom tepla a vlhkosti, hlavným zdrojom a záchytným miestom atmosférického CO₂. Bez neho by aj skleníkový efekt nadobudol katastrofálne rozmery. Horné vrstvy oceánov však odoberajú z atmosféry veľké množstvo CO₂, ktoré sa do nej dostáva ľudskou činnosťou.

V polovici 90-tych rokov sa začína v modeloch uvažovať aj s vplyvom pôsobenia aerosólov a ich radiačných účinkov v systéme a do modelov sa dostáva aj biosféra (vegetácia). V súčasnosti prebieha vo viacerých modelových centrách rozpracovávanie globálneho uhlíkového cyklu a atmosférickej chémie. Postupne s tým, ako sa podrobnejšie prepracovávali a zdokonaľovali jednotlivé modely, zlepšovalo sa ich horizontálne rozlíšenie (hustejšia sieť gridových/uzlových bodov) a rástol aj počet vertikálnych hladín (v atmosférickej i oceánickej časti modelu), pokrok zaznamenala aj parametrizácia. Nové modely berú do úvahy postupný rast skleníkových plynov v atmosfére na rozdiel od predchádzajúcich modelov, v ktorých bola koncentrácia zvýšená na dvojnásobok jednorazovo. Novšie modely majú k dispozícii väčší počet klimatických charakteristík (premenných) a mnohé tieto charakteristiky prechádzajú na kratší časový krok (z ročných a mesačných na denné hodnoty). V posledných rokoch vznikli vo viacerých centrách aj regionálne modely pre rôzne oblasti sveta. Tieto modely vychádzajú z počiatočných podmienok priamo z globálnych GCM modelov.

V samotnom stredisku GFDL na Princetonskej univerzite vyvinuli už niekoľko druhov modelov a ich verzií. Medzi ďalšie najaktívnejšie pracoviská, ktoré sa zúčastňujú na vývoji klimatických modelov patria ešte Goddardov ústav pre výskum vesmíru pri NASA v New Yorku, USA (GISS), Národné centrum pre atmosférický výskum v Boulder, USA (NCAR), Kanadské stredisko pre klimatické modelovanie a analýzy vo Victorii, Kanada (CCC) a v Európe sú to hlavne Meteorologický úrad Spojeného kráľovstva v Bracknell, Veľká Británia (UKMO), Inštitút Maxa Plancka pre meteorológiu v Hamburgu, Nemecko (MPI) a Météo France v Toulouse, Francúzsko.

4.1 Prehľad použitých 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 klimatických modelov: GISS (1982), CCCM (1989), UKMO (1989), GFDL (1989), GFDL (1991). Čísla v zátvorkách znamenajú rok vypracovania modelu.

Vývoj pri modelovaní klímy je veľmi rýchly a nakoľko tieto modely patria už medzi staršie verzie, našou snahou bolo aktualizovať pôvodne vypracované scenáre z týchto modelov, a to na základe výstupov z novších modelov. Podarilo sa nám získať nové modelové výstupy z Kanadského strediska pre modelovanie a analýzy klímy vo Victorii (Britská Kolumbia, Kanada), a to konkrétne modely CCCM (1992), CCCM (1997). Ďalším novým modelom, ktorý sme získali, je najnovší model (GISS 1998) Goddardovho ústavu pre vesmírne štúdie pri NASA (New York, USA). V ďalšom texte sa nachádzajú informácie o vyvinutých modeloch z týchto dvoch svetových modelových centier.

4.1.1 Kanadské stredisko pre modelovanie a analýzy klímy (CCCM, Victoria)

V tomto stredisku doteraz vyvinuli štyri klimatické modely. Prvým je atmosférický model 1. generácie (CCCM 1989), z ktorého sme mali k dispozícii výstupy v projekte U.S. Country Studies Program. Ďalej je to atmosférický model 2. generácie (CCCM 1992). V súčasnosti je kompletizovaný už atmosférický model 3. generácie, z ktorého však zatiaľ nie sú výstupy ešte k dispozícii. Štvrtým modelom z tohto pracoviska je prepojený model 1. generácie (CCCM 1997), z ktorého máme k dispozícii dva súbory modelových výstupov (jeden iba pre rast GHGs a druhý pre rast GHGs spolu aj so zahrnutím účinkov rastu aerosólov). K dispozícii máme teda v súčasnosti spolu štyri súbory modelových výstupov troch klimatických modelov tohto strediska.

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. Atmosférický model má 10 vertikálnych hladín, pričom vrchol najvyššej vrstvy je stanovený na hladine 5 mb. Výsledky z tohto typu modelu boli širšie prezentované vo viacerých prácach aj na Slovensku (Lapin et al., 1995, Lapin et al., 1997).

Model CCCM 1992 predstavili McFarlane et al. (1992), Boer et al. (1992). Atmosférický model je spojený s oceánickým modelom, ktorý má jednoduchú premiešavaciu vrstvu s termodynamickou morskofadovcovou zložkou. V porovnaní s predchádzajúcim modelom sa odlišuje v numerickom spracovaní základných rovníc, ako aj v niektorých fyzikálnych parametrizáciách. Atmosférický model má 10 vertikálnych hladín, pričom vrchol najvyššej vrstvy je stanovený na hladine 5 hPa. Tento model používa ako vlhkovú 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 morskofadovcová 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 mrazu morského ľadu sa začína formovať ľad. Rast globálnej teploty pri $2\times\text{CO}_2$ v porovnaní s $1\times\text{CO}_2$ je $3,5^\circ\text{C}$.

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. Atmosférickou zložkou tohto modelu je v podstate atmosférický model 2. generácie (CCCM 1992) a oceánická zložka vychádza z modelu Geofyzikálneho laboratória dynamiky tekutín Princetonskej univerzity (New Jersey, USA) GFDL MOM1.1. Atmosférická časť modelu má horizontálne rozlíšenie zhruba $3,7^\circ \times 3,7^\circ$ (spektrálny model s 32 vlnami) a 10 vertikálnych hladín. Oceánická časť modelu má horizontálne rozlíšenie $1,8^\circ \times 1,8^\circ$ a 29 vertikálnych hladín. Model predpokladá postupný rast GHGs v atmosfére zodpovedajúci pozorovaniám 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 GHGs v atmosfére je určené na obdobie medzi rokmi 1980 a 2050.

Z tohto modelu máme v okolí Slovenska rozmiestnených šesť gridových bodov. Prvý gridový bod sa nachádza v Slovinsku východne od Ljubljany ($46,39\text{N}$, $15,00\text{E}$, 597 m n.m.), druhý je v južnom Maďarsku ($49,39\text{N}$, $18,75\text{E}$, 616 m n.m.), tretí v rumunských Karpatoch ($46,39\text{N}$, $22,50\text{E}$, 554 m n.m.), štvrtý východne od Prahy ($50,10\text{N}$, $15,00\text{E}$, 442 m n.m.), piaty v Sliezsku západne od Katovic ($50,10\text{N}$, $18,75\text{E}$, 531 m n.m.) a šiesty v juhovýchodnom Poľsku ($50,10\text{N}$, $22,50\text{E}$, 566 m n.m.). Ako je vidieť z nadmorských výšok jednotlivých bodov, model má veľmi zjednodušenú a zhladenú orografiu, nakoľko v stredoeurópskej oblasti pozná len spoločné alpsko-karpatské pohorie bez Panónskej panvy. Hodnoty v jednotlivých uzlových bodoch teda vyjadrujú akýsi priestorový klimatický priemer celej okolitej oblasti.

4.1.2 Goddardov ústav pre vesmírne štúdie pri NASA (GISS, New York, USA):

V stredisku GISS boli doteraz vyvinuté 4 klimatické modely, vrátane jedného prechodového modelu.

- 1. model bol dokončený v roku 1982. Berie do úvahy denný cyklus, má horizontálne rozlíšenie $7,83^\circ \times 10,0^\circ$ a 9 vertikálnych hladín. Model využíva jednoduchý, 65 m hlboký tzv. "slab" oceán,

pričom sa uvažuje so zmenou premiešavacej hĺbky počas sezónneho cyklu. V stredných zemepisných šírkach je hĺbka plytšia v letnom období v porovnaní so zimným. Model simuluje rovnovážnu odozvu, globálna povrchová teplota sa pre $2xCO_2$ v porovnaní s $1xCO_2$ zvýši o $4,2^\circ C$. Výsledky z tohto typu modelu boli širšie prezentované vo viacerých prácach aj na Slovensku (Lapin et al., 1995, Lapin et al., 1997).

- 2. model bol dokončený v roku 1985 a simuluje prechodovú odozvu. V porovnaní s predchádzajúcim modelom má väčšiu premiešavaciu hĺbku.
- 3. model je novou verziou pôvodného modelu so simuláciou rovnovážnej odozvy. Má lepšie horizontálne rozlíšenie ($3,9^\circ \times 5,0^\circ$), zahrňuje 15-18 vertikálnych hladín a má zabudovaný "slab" oceán. Tento model bol dokončený v roku 1994.
- Najnovší model, ktorý je prepojeným atmosféricko-oceánickým modelom, predstavil kolektív tohto strediska v roku 1998. Nám sa podarilo získať tieto modelové výstupy priamo zo strediska prostredníctvom CD-ROM.

Hewitson a Crane (1992) stručne opisujú verziu modelu GISS $4^\circ \times 5^\circ$ GCM Model II. Model má zabudovanú geografiu, ktorá zodpovedá skutočnosti, interagujúce oblaky, terestrickú vegetáciu a hydrológiu, polárne morské ľadovce, niektoré dynamické alebo termodynamické interakcie s oceánickým povrchom. Od predchádzajúcej verzie sa líši použitými numerickými metódami, parametrizačnými schémami, v horizontálnej rozlišovacej schopnosti. Model je globálny v horizontálnom rozsahu, s rozlišovacou schopnosťou $4^\circ \times 5^\circ$. Model je 9-vrstvový s dvoma subvrstvami v hraničnej vrstve, piatimi vo zvyšnej troposfére a dvoma v stratosfére. Vrchol modelovej atmosféry je stanovený na hladine 10 mb. V modeli sa uvažuje s radiačným ohrevom, prenosom energie, hmotnosti a hybnosti v horizontálnom aj vertikálnom smere. Zahrnutá je aj parametrizácia oblačnosti, ako aj interakcia zem-atmosféra prostredníctvom prízemnej vrstvy atmosféry. Interakcie medzi povrchom a atmosférou sú závislé od typu povrchu. V modeli je zahrnutý aj výskyt snehovej pokrývky a ľadu. Oblačnosť je zadaná ako časť každého gridového poľa pre každú hladinu, morské ľadovce a povrchové morské teploty sú stanovené klimatologicky.

Model GISS popisuje Russell (1998) z NASA/Goddardovho inštitútu pre vesmírne štúdiá na CD-ROM. Model má horizontálne rozlíšenie 5° v zemepisnej dĺžke a 4° v zemepisnej šírke. Atmosférická časť modelu je zložená z deviatich vrstiev, oceánická časť berie do úvahy maximálne trinásť vrstiev (približné rozloženie týchto vrstiev je 12 m, 18 m, 27 m, 40,5 m, 61 m, 91 m, 137 m, 205 m, 308 m, 461 m, 692 m, 1038 m a 1557 m, čo vyjadruje geometrický rad s násobkom rastu 1,5). Atmosféricko-oceánický model má zahrnutú realistickú topografiu zemského terénu, ako aj realistické krajinné zloženie. Insolácia má vlastný sezónny a denný cyklus. Každý horizontálny gridový štvorec je buď celý pevninský alebo celý oceánický. Každý pevninský štvorec môže mať zložku pevniny, ľadovca, otvoreného jazera, alebo jazerného ľadu. Každý oceánický štvorec môže obsahovať morský ľad, ktorého horizontálna plocha, a tiež aj jeho hrúbka, kolíše v závislosti od miesta a času. Viaceré aspekty tohto modelu sú jedinečné alebo nezvyčajné, tak napríklad lineárna výstupná schéma pre advekciu potenciálnej entalpie, vodnej pary a solí, nová C gridová dynamická schéma pre oceánickú hybnosť, kontinentálny tok vody v riekach, ktorý napája oceán, výpočet úžinových tokov v oceáne, udržiavanie konzervatívnej oceánickej hmotnosti a predpovede oceánických povrchových výšok.

Atmosférická časť modelu sa vyznačuje týmito charakteristikami:

1. Dynamika hmotnosti a hybnosti využíva C gridovú schému podľa Arakawu
2. Advekcia tepla a vodnej pary používa lineárnu výstupnú schému
3. Konvekcia vlhkosti je v horizontálnom rozlíšení vypracovaná na jednotlivé štvorce siete
4. Hrúbka optickej oblačnej vrstvy závisí od druhej odmocniny kondenzácie
5. Zjednodušený, ale zdokonalený výpočet tokov fyzikálnych veličín v blízkosti povrchu Zeme

Oceánická časť modelu:

1. Dynamika hmotnosti a hybnosti využíva modifikovanú C gridovú schému
2. Advekcia tepla a salinity využíva lineárnu výstupnú schému
3. Konvekcia sa vyskytne vtedy, keď štruktúra hustoty oceánického stĺpca sa stane nestabilnou
4. Richardsonova vertikálna difúzia sa vyskytuje hlavne v horných vrstvách (vertikálna difúzia v oceáne rastie pri malom Richardsonovom čísle)
5. Hmotnosť je konzervatívna (nie objemovo), uvažuje sa s voľnou povrchovou výškou
6. Model rozlišuje 12 oceánických úžin
7. Neberie sa do úvahy žiadna horizontálna difúzia tepla alebo solí

Morský ľad:

1. Každý štvorec môže mať morskú-ľadovcovú zložku s variabilnou hrúbkou
2. Zhrubnutie ľadovcovej zložky sa uskutočňuje v dôsledku snehových zrážok alebo zamŕzaním oceánu
3. Topenie ľadovcovej zložky nastane pri povrchových tokoch (insolácia) alebo od teplého oceánu
4. Neobsahuje soli, konzervuje energiu a hmotu
5. Advekcia morského ľadu využíva modifikovanú lineárnu výstupnú schému

Atmosféricko-oceánické prepojenie:

1. Atmosférické a oceánické toky fyzikálnych veličín od povrchu majú opačné znamienko a sú prekryté každú hodinu
2. Kontinentálny tok vody v riekach prúdi do oceánu vo vhodnom časovaní
3. Korekcia toku vody v riekach sa neberie do úvahy

Nový prepojený atmosféricko-oceánický model bol vyvinutý pre klimatické predpovede v časovom horizonte od desaťročí po storočie. Všetky dôležité plyny, ako aj aerosólové častice sú zahrnuté v modeli.

Atmosféricko-oceánický NASA/GISS model obsahuje tri simulácie, a to simuláciu s konštantnou atmosférickou kompozíciou z roku 1989, simuláciu zahrňujúcu 1% rast CO_2 (ročne) a simuláciu zahrňujúcu 1% rast CO_2 v spojení s kolísaním troposférickych síranových aerosólov. Síranové aerosóly rastú až do roku 2050 a po tomto období veľmi pomaly klesajú. Najväčšie koncentrácie sa premiestňujú z oblastí USA a Európy do oblastí východnej Číny. Pri našom spracovaní využívame zmienenú prvú a tretiu simuláciu (ktorá uvažuje aj so zmenou troposférických aerosólov). Táto simulácia je v globálnom priemere chladnejšia, ako simulácia iba s rastom skleníkových plynov. Všetky tri simulácie sú integrované v období od 1990 do 2099. Rozloženie gridových bodov modelu GISS 1998 v okolí Slovenska je podobné ako pri modeli CCCM (vynechávame západne ležiace body 1 a 4): 2. bod má zemepisné súradnice 46°N a $17,5^\circ\text{E}$ a leží v oblasti juhozápadného Maďarska, 3. bod má zemepisné súradnice 46°N a $22,5^\circ\text{E}$ a leží v karpatskej oblasti v západnom Rumunsku, 5. bod má zemepisné súradnice 50°N a $17,5^\circ\text{E}$ a leží na severnej Morave a 6. bod má súradnice 50°N a $22,5^\circ\text{E}$ a leží v oblasti juhovýchodného Poľska. Nadmorská výška uzlových bodov v strednej Európe je 300-600 m n.m. a nebola dodaná v súboroch na CD.

Nové modelové výstupy poskytujú oveľa väčší rozsah klimatických charakteristík v porovnaní s predchádzajúcimi verziami modelov. Tak napríklad, najnovší kanadský model (CCCM 1997) obsahuje klimatické charakteristiky: teplota vzduchu (vo výške 2 m nad zemským povrchom), priemerná denná maximálna teplota vzduchu, priemerná denná minimálna teplota vzduchu, povrchová teplota, zrážky, evaporácia (evapotranspirácia), tlak vzduchu, priemerná rýchlosť vetra (2 m), pôdna vlhkosť, merná vlhkosť vzduchu (2 m), oblačnosť, globálne žiarenie, obsah vody v snehovej pokrývke, geopotenciálna výška hladín 200 hPa, 500 hPa, 850 hPa a 1000 hPa, teplota vzduchu na hladinách 200 hPa, 500 hPa a 850 hPa a mnohé ďalšie charakteristiky. Výstupy modelu sú v tvare časových radov ročných, mesačných, a v niektorých prípadoch aj denných hodnôt klimatických prvkov (vrátane prvkov pre izobarické hladiny vo voľnej atmosfére) pre obdobie 1900-2100, pričom obdobie 1900-1990 sa považuje za kontrolné.

Ďalší najnovší prepojený GCM model, z ktorého máme k dispozícii výstupy – model GISS 1998, má podobné parametre ako CCCM 1997, len výstupy sú v tvare desaťročných priemerov. K dispozícii je však podstatne širšia škála modelovaných klimatických prvkov. Model GISS 1998 má k dispozícii tieto klimatické charakteristiky: planetárne albedo, povrchové albedo, absorbované slnečné žiarenie planéty, absorbované slnečné žiarenie povrchu, globálne žiarenie, tepelná radiácia na povrchu, energia zrážok alebo latentná energia snehu, odchádzajúca tepelná radiácia planéty, turbulentný tok tepla z povrchu do atmosféry, snehová akumulácia mínus topenie nad ľadovcami, vertikálny oceánický teplotný transport, oceánická povrchová výška nad globálnou priemernou hladinou svetového oceánu, hmota morského ľadovca, horizontálne rozmiestnenie oceánickej ľadovej pokrývky, oceánická povrchová salinita, atmosférické zrážky, konvektívne zrážky, štandardná odchýlka denných zrážok, povrchový tlak na dne atmosféry, tlak vzduchu na hladine mora, štandardná odchýlka denného povrchového tlaku, oblačnosť, evaporácia (evapotranspirácia), merná vlhkosť vzduchu na hladinách 500 mb a 850 mb, merná vlhkosť vzduchu na povrchu, vertikálne integrovaná pôdna vlhkosť nad povrchom, riečna hmota odchádzajúca z každého kontinentálneho gridového štvorca, povrchový a podpovrchový zdroj odtoku nad zemou, snehová hmota, snehová pokrývka z každého povrchového typu, teplota vzduchu na hladinách 200 mb, 500 mb, 850 mb, povrchová teplota (oceánu, zemského povrchu, povrchu ľadovca, povrchu jazera, jazerného ľadu), teplota vzduchu (vo výške 2m), denná minimálna a denná maximálna teplota vzduchu (2m), štandardná odchýlka dennej teploty vzduchu (2m), oceánická povrchová teplota, povrchová rýchlosť vetra, geopotenciálne výšky na hladinách 200 mb, 500 mb, 850 mb a mnohé ďalšie charakteristiky.

4.2 Zhrnutie kapitoly o klimatických modeloch

Klimatické modely sú čoraz úspešnejšie pri simulácii klimatického systému. Do ich štruktúry sa postupne zabudováva stále väčšie množstvo existujúcich väzieb tohto systému. Problémom však naďalej zostávajú niektoré ďalšie dôležité väzby, ktoré sa zatiaľ pri modelovaní vôbec neberú do úvahy, prípadne samotná väzba nie je v súčasnosti dostatočne preštudovaná. V blízkej dobe sa očakávajú zlepšenia v dynamike oblakov a v parametrizácii oblačnej mikrofyziky, ďalej pokroky v oceánickej zložke klimatického modelu, zlepšenia morského-ladovcového modelu a tiež zlepšenia krajinných procesov. Zdokonaľiť by sa mala radiačná schéma v modeloch, zvlášť zahrnutím vertikálnych profilov koncentrácie troposférických aerosólov a troposférického ozónu. Okolo roku 2000 sa predpokladajú výsledky experimentov s vplyvom zmien atmosférickej chémie na klímu a zhruba o päť rokov sa predpokladá zapracovanie pedosféry do klimatických modelov. Zmeny v oblastiach pokrytých permafrostom môžu mať významný vplyv na klímu, pretože v permafroste sú zachytené GHGs a pri prípadnom roztápaní by sa tieto plyny uvoľňovali do atmosféry, čím by zosilňovali skleníkový efekt. Tento proces má byť ešte zahrnutý do prepojených klimatických modelov. Očakáva sa tiež zahrnutie vln do modelov (ECSN 1995). Predpokladáme tiež dosiahnutie pokroku pri detailnejšom poznávaní určitej oblasti, a to jednak jemnejším horizontálnym rozlíšením globálnych klimatických modelov a jednak ďalším rozvojom regionálnych klimatických modelov.

5. ANALÝZA ÚDAJOV PRED REGIONÁLNOU INTERPRETÁCIOU MODELOVÝCH VÝSTUPOV GCMs

Budúca klíma (budúce podnebie) akéhokoľvek miesta na Zemi bude veľmi pravdepodobne závisieť od dvoch rozhodujúcich fenoménov. 1. Od charakteru prirodzených zmien, variability a kolísania klímy; 2. Od veľkosti vplyvu "zmeny klímy" spôsobenej antropogénne podmieneným rastom skleníkového efektu atmosféry. Obidva tieto fenomény budú zrejme ešte dlho veľmi ťažko odlišiteľné najmä z toho dôvodu, že prirodzené zmeny, variabilita a kolísanie klímy dosahujú v krátkom časovom horizonte (do niekoľkých desaťročí) relatívne veľké odchýlky od dlhodobých priemerov a pomerne malý alebo neurčitý dlhodobý časový trend. Z praktických dôvodov je potrebné pripravovať scenáre "zmeny klímy" ako zmeny dlhodobých priemerov nad úroveň prirodzených zmien klímy a tiež aj ako scenáre možného budúceho vývoja klímy v tvare určitým spôsobom "generovaných" časových radov klimatických údajov.

Regionálnu interpretáciu scenárov zmeny klímy môžeme robiť na základe troch primárnych metód: 1. Z výstupov modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs); 2. Metódou založenou na analýze analógov v historických radoch meteorologických pozorovaní; 3. Metódou tzv. prírastkových (inkrementálnych) scenárov. Možno je tiež kombinácia všetkých troch primárnych metód. Dôležitým predpokladom je fyzikálna korektnosť (plausibility) metód prípravy scenárov klimatickej zmeny. Pri regionálnej interpretácii výstupov GCMs sa vždy berie ohľad na minulé pozorovanú klímu.

Ako príklad uvádzame regionálnu interpretáciu výstupov GCMs CCCM a GISS. Podrobnejšia charakteristika modelov CCCM a GISS, ako aj stručná teória modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry, je v kapitole 4. Ide o tzv. verziu prepojených GCMs 1. generácie (atmosféra a oceán). Výstupy boli spracované v rokoch 1998 a 1999 a Katedra meteorológie a klimatológie ich získala priamo od spracovateľov z Kanady a USA. Prepojený model CCCM, nazveme ho tu "CCCMprep", počíta mesačné priemery klimatických údajov v sieti uzlových bodov s horizontálnym rozlíšením zhruba $3.7^\circ \times 3.7^\circ$. Časový krok výstupov je jeden mesiac v období 1900 až 2100, pričom pre 1900-1990 je tzv. kontrolné obdobie. Pre regionálnu interpretáciu výstupov tohoto GCM sme vybrali 6 uzlových bodov v okolí Slovenska (kap. 4), no v konečnom dôsledku sme 2 západne ležiace uzlové body vynechali zo spracovania. Prepojený model GISS, nazveme ho "GISSprep", počíta hodnoty klimatických prvkov ako ročné priemery v období 1990 až 2099 a desaťročné priemery po jednotlivých mesiacoch v rovnakom období v sieti uzlových bodov s horizontálnym rozlíšením $4^\circ \times 5^\circ$. Zvláštnosťou modelu GISSprep je to, že za kontrolnú klímu považuje modelový výpočet pre obdobie 1990 až 2099 so stavom koncentrácie CO_2 a aerosólov v roku 1989. Z tohoto modelu sme využili 4 najbližšie uzlové body v okolí SR a tiež ich označujeme 2, 3, 5 a 6 (kap. 4).

Už z tohoto prehľadu je jasné, že modely berú do úvahy orografiu strednej Európy ako veľmi zhladenú a "nepoznajú" ani Panónsku kotlinu (Alpy a Karpaty tvoria jedno ploché pohorie). Hodnoty v jednotlivých uzlových bodoch teda vyjadrujú akýsi priestorový klimatický priemer pri orografickej expozícii terénu značne vzdialenej od reálnej skutočnosti. Väčšie rozlíšenie je možné iba v regionálnych GCMs, ktorých spoľahlivosť (posudzovaná podľa zhody s pozorovanou klímou) je doteraz ešte horšia ako pri globálnych GCMs. Napriek tomu poskytujú výstupy týchto GCMs niektoré veľmi cenné informácie o budúcom

“správaní sa” klímy. Pokúsme sa najprv porovnať výstupy týchto GCM s reálnymi klimatickými hodnotami v období 1901-1990. V konečnom spracovaní sme vybrali iba uzlové body 2, 3, 5 a 6, ktoré pomerne dobre reprezentujú hlavné typy klimatického režimu na našom území a označujeme ich v nasledujúcich kapitolách aj ako A, B, C a D, pričom body A a B ležia na juh a C a D na sever od Slovenska. Na tomto mieste posudzujeme iba mesačné priemery teploty vzduchu a mesačné úhrny zrážok, neskôr to inak urobíme aj pre globálne žiarenie a mernú vlhkosť vzduchu. Porovnanie robíme s výsledkami pozorovaní na viacerých staniciach na Slovensku a s celkovým priemerom pre celé Slovensko (obr.6). Pre zrážky sme vybrali porovnávacie obdobie 1901-1990 a pre teplotu vzduchu obdobie 1951-1980. Príčinou rozdielných období je skutočnosť, že pre zrážky nepostačuje 30-ročné obdobie kvôli veľkej premenlivosti 30-ročných období (tab.1). Pri teplote vzduchu nemáme k dispozícii priemery za obdobie 1901-1990 z väčšieho počtu staníc a 30-ročné obdobie plne postačuje na charakterizovanie ročného chodu (tab.2, navyše obdobie 1951-1980 odporúča IPCC ako základ pre odvodzovanie scenárov teploty vzduchu). Pri teplote vzduchu je pokles amplitúdy ročného chodu teploty vzduchu od východu na západ a s rastúcou nadmorskou výškou. Tiež existuje fázový posun ročného chodu teploty vzduchu s nadmorskou výškou (teplejšia jeseň ako jar a relatívne chladnejší február a teplejší august na Lomnickom štíte) Lapin et al (1999, 2000). Na obr.6 vidíme zreteľne dva hlavné vplyvy na ročný chod zrážok na Slovensku - vnútrozemský s výrazným maximom v lete a minimom v druhej polovici zimy a stredomorský s výrazným minimom v druhej polovici leta a s maximami na jar až začiatkom leta a v neskorej jeseni až začiatkom zimy. Hurbanovo je reprezentantom pomerne značného vplyvu stredomorského ročného chodu v oblasti juhozápadného Slovenska a juhu stredného Slovenska a Poprad je reprezentantom kotlín na severovýchode Slovenska s výrazným ročným chodom. Aj v Poprade je však maximum zrážok v júni, čo je tiež určitým prejavom vplyvu Stredomoria. Oravská Lesná, Lazy pod Makytou a Habura majú už maximum zrážok v júli a august má porovnateľné zrážkové úhrny ako jún, čo je prejavom minima vplyvu Stredomoria na zvýšenie jarných zrážok. Na severozápade Slovenska sa však výraznejšie zvyšujú úhrny zrážok neskorej jesene, podobne ako v západnej Európe, s maximom až v decembri. Jesenné zvýšenie úhrnov zrážok na juhu a východe Slovenska (s maximom v októbri až novembri) má stredomorský pôvod. Tento rozsiahlejší popis sme uviedli z dôvodu lepšieho pochopenia metodiky regionálnej interpretácie výstupov GCMs pri konštrukcii scenárov klimatickej zmeny pre SR.

Na dokreslenie použiteľnosti výstupov modelu CCCMprep a GISSprep uvádzame na obr.7 až 11 ročný chod teploty vzduchu a úhrnov zrážok v uzlových bodoch 1, 2, 3, 4, 5 a 6 (pre CCCMprep) a na celom Slovensku. Z tohoto spracovania je vidieť, že východnejšie uzlové body 3 a 6 pri modeli CCCMprep lepšie zodpovedajú ročnému chodu teploty vzduchu na celom Slovensku v priemere, no aj tie majú relatívne teplú zimu a relatívne studené mesiace apríl až jún (obr.7 a 8). Zrejme to súvisí s celkovo maritimnejším pojatím klímy strednej Európy v tomto modeli. Pri modeli GISSprep sú rozdiely medzi uzlovými bodmi oveľa menšie a pri všetkých štyroch uzlových bodoch je o niečo tesnejší ročný chod teploty vzduchu s pozorovanými hodnotami v období 1901-1990 na Slovensku (obr.9).

Na obr.10 vidíme podstatne odlišný ročný chod zrážok pri južných uzlových bodoch 1, 2 a 3 modelu CCCMprep v porovnaní so severnými bodmi 4, 5 a 6. Dá sa povedať, že južné body zodpovedajú stredomorskému režimu zrážok a severné vnútrozemskému. Je pritom zaujímavé, že body 4 a 5 majú výrazne menší ročný chod zrážok ako bod 6, čo je v zhode s pozorovaniami (smerom na západ sa viac prejavuje vplyv Atlantického oceánu a zvyšujú sa zimné úhrny zrážok, kým na východe sa vplyvom väčšieho prehriatia kontinentu zvyšujú konvektívne úhrny zrážok). Úhrny zrážok podľa modelu CCCMprep, rovnako ako podľa iných modelov, sú podstatne vyššie ako priemerné úhrny na Slovensku. Túto skutočnosť môžeme vysvetliť najmä tým, že modely majú zabudovanú zjednodušenú orografiu s nepatrnými zveternými efektami (skoro na celom Slovensku sa však v pozorovanej klíme prejavuje výrazný zveterný efekt Álp a Karpát a jeho výsledkom je zmenšenie úhrnov zrážok). Ďalším zdrojom rozdielov je skutočnosť, že merané úhrny zrážok sú zaťažené celým radom systematických chýb merania, ktorých ročná suma dosahuje v SR okolo 15% a v zime aj vyše 20%. Po pripočítaní korekcie na odstránenie vplyvu systematických chýb merania zrážok by bol rozdiel meraných úhrnov a úhrnov podľa výstupov modelu CCCMprep podstatne menší. Pri modeli GISSprep sme už brali do úvahy len najbližšie uzlové body 2, 3, 5 a 6. Je zreteľne vidieť (obr.11), že lepšie vyjadrujú ročný chod a výšku úhrnov zrážok na Slovensku ako výstupy modelu CCCMprep. Ide predovšetkým o veľkosť priemerných mesačných úhrnov zrážok v kontrolnom období 1990-2079 pre model GISSprep (toto obdobie je pre stav koncentrácie CO₂ a aerosólov z roku 1989 a iba do určitej miery charakterizuje pri GISSprep obdobie 1901-1990). Pri všetkých 4 bodoch vidíme reálny ročný chod zrážok, južné body modelu CCCMprep majú však lepšiu zhodu s pozorovaným ročným chodom mesačných normálov zrážok na Balkáne.

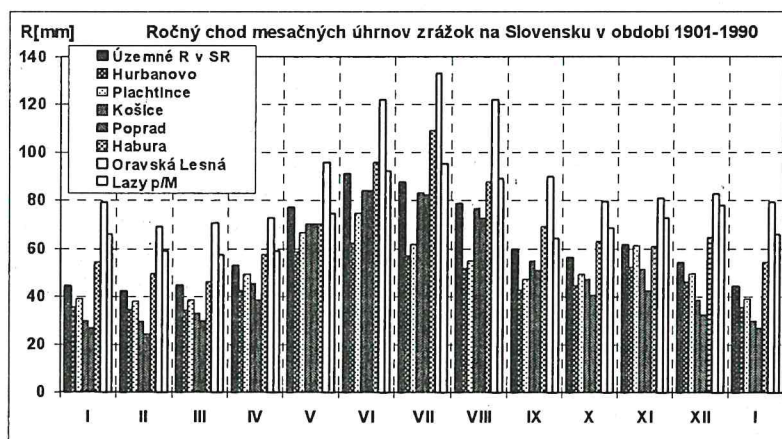
Tab. 1 Dlhodobé priemery mesačných, ročných a sezónnych úhrnov zrážok vyjadrené v % dlhodobého priemeru z obdobia 1901-1990 (HU - Hurbanovo, KO - Košice, LH - Liptovský Hrádok, SR - územný priemer z 203 staníc v SR).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK	IV-IX	X-III
HU															
1901-50	105.1	100.1	112.9	106.5	106.4	93.5	103.3	96.0	104.3	115.1	101.2	107.3	103.7	101.3	106.7
1951-80	94.2	99.5	83.9	98.4	88.1	111.2	107.0	100.6	95.8	86.7	103.8	91.7	97.6	100.6	93.5
1980-99	84.6	81.2	80.9	86.7	103.5	103.6	96.4	100.1	106.0	93.7	99.5	90.4	95.2	99.8	88.7
KO															
1901-50	102.7	101.7	108.9	107.9	101.8	96.9	96.8	100.9	105.6	110.1	108.0	103.6	102.8	100.8	106.2
1951-80	96.1	100.9	82.2	88.8	95.9	102.0	110.1	101.1	91.0	90.3	97.3	96.9	97.5	99.5	94.2
1980-99	73.5	78.9	86.3	107.4	91.0	106.4	99.6	92.7	93.6	99.8	81.6	81.6	93.4	98.3	85.4
LH															
1901-50	107.5	109.0	111.7	106.7	105.9	97.3	105.6	106.6	104.3	105.4	106.4	98.5	104.8	104.1	106.1
1951-80	87.6	89.9	83.2	95.3	82.8	107.6	100.9	91.6	90.9	98.6	92.9	95.3	94.2	95.5	90.9
1980-99	83.1	85.0	94.5	99.4	99.7	93.7	87.5	88.4	102.9	108.7	93.2	105.3	95.1	94.5	97.2
SR															
1901-50	101.4	99.4	104.9	102.0	101.4	96.1	101.6	101.3	105.0	108.7	103.2	97.9	101.6	100.9	102.5
1951-80	98.3	103.9	94.0	100.5	91.8	107.3	105.7	100.1	90.8	94.1	99.8	101.9	99.5	100.1	98.6
1980-99	85.2	89.2	92.5	104.3	105.4	100.0	90.7	92.4	108.3	100.6	92.7	96.9	96.9	99.4	93.8

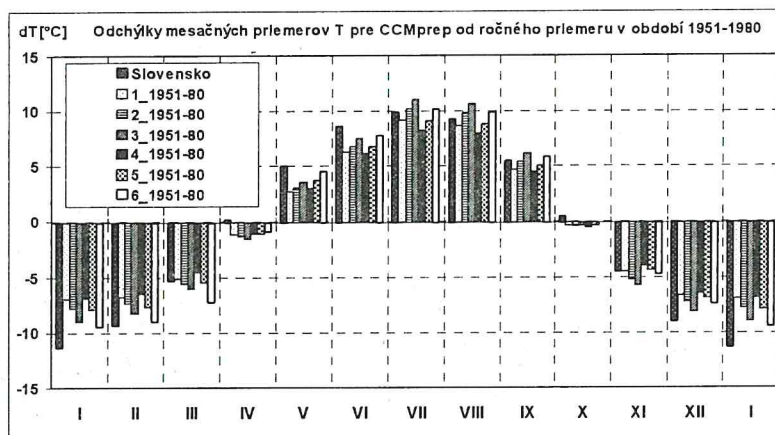
Pozn.: V tab.1 vidíme niekoľko príkladov rizík spojených s používaním zrážkových normálov z krátkych období. Ak robíme regionálnu modifikáciu výstupov GCMs podľa normálu (R_o) z dlhého radu 1901-1990, získame kvocienty (q_o) na stanovenie úhrnov zrážok pre budúce časové horizonty $R_{oi} = R_o \cdot q_o$. Ak potom chceme použiť normál R z iného obdobia musíme použiť prepočtový koeficient $k = R_o/R$, ktorý môže mať väčšiu hodnotu ako pôvodný kvocient zrážkového scenára (L. Hrádok v I, II, VIII...).

Tab. 2 Odchýlky dlhodobých priemerov teploty vzduchu T [°C], tlaku vodnej pary TP [%] a trvania slnečného svitu SS [%] od priemeru 1901-1990 v Hurbanove (H) a iba pre T v Liptovskom Hrádku (LH); **Pozn.:** T , TP a SS z obdobia 1951-1980 sa líšia od normálov z obdobia 1901-1990 väčšinou iba nepatrne, nevznikajú tu teda také problémy s modifikovanými scenármi ako pri R , tieto odchýlky sú zrejme takmer rovnaké v celej SR; mernú vlhkosť vzduchu sme modifikovali iba podľa zmien T a globálne žiarenie sme nemodifikovali pri zmene referenčných období (1901-90, 1951-80) v tejto etape vôbec (TP a SS boli homogenizované podľa Viedne, HW)

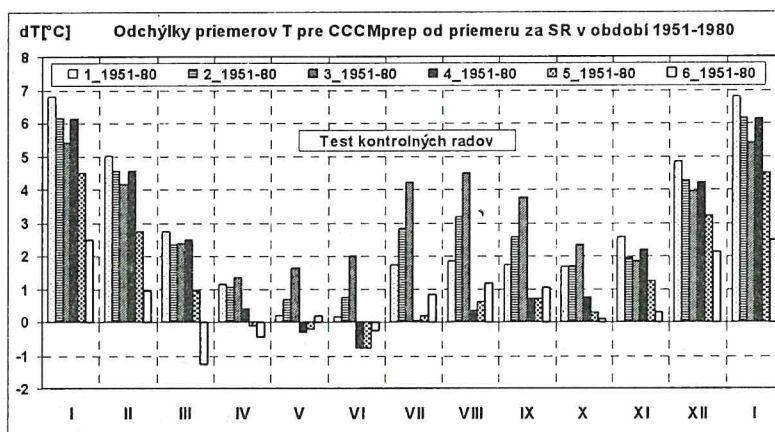
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK	IV-IX	X-III
T 1901-50 (H)	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2
T 1951-80 (H)	0.2	0.5	0.0	0.2	-0.1	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.2	0.2	0.1	0.2
T 1980-99 (H)	1.0	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.7	0.9	0.3	0.3	-0.4	0.0	0.4	0.5	0.3
TP 1951-80 (H)	-1.6	1.5	-1.2	-0.5	-3.3	1.8	1.2	1.0	0.4	-1.3	0.8	-1.0	0.0	0.3	-0.5
TP 1980-99 (H)	3.7	-1.5	-1.6	-3.9	-2.4	-1.0	-1.0	1.1	2.0	-1.0	-5.8	-3.4	-1.0	-0.9	-1.3
SS 1951-80 (H)	-4.4	-2.3	-4.2	1.7	-3.2	-0.4	-3.6	-2.0	2.3	1.1	-12.6	1.1	-1.7	-1.1	-3.1
SS 1980-99 (H)	2.8	11.8	-2.9	-5.0	-2.9	-8.0	-2.3	-1.3	-6.9	1.8	5.8	10.3	-2.1	-4.3	3.6
T 1901-50 (LH)	-0.2	-0.4	-0.1	-0.2	-0.1	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2
T 1951-80 (LH)	0.2	0.5	-0.1	0.1	-0.1	0.5	0.0	0.1	0.0	0.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.3
T 1980-99 (LH)	1.1	0.6	0.4	0.2	0.6	0.5	0.7	0.8	0.3	0.2	-0.5	-0.2	0.4	0.5	0.3



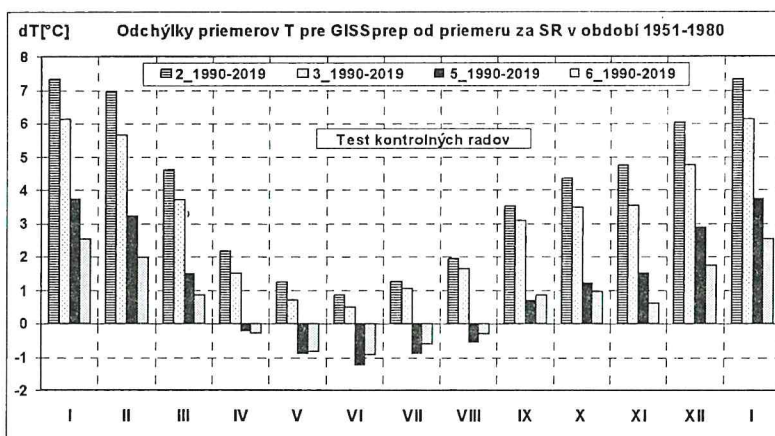
Obr. 6. Ročný chod mesačných úhrnov zrážok za obdobie 1901-1990 pre 7 staníc a pre územný priemer zrážok v SR (z 203 staníc); z grafu je vidieť posun hlavného maxima z júla na jún až máj, charakter jesenného podružného maxima a minima zrážok ako aj iné rozdiely medzi stanicami.



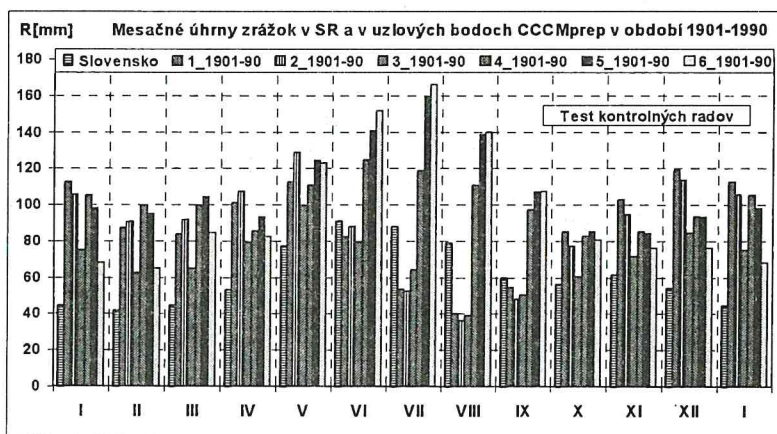
Obr. 7 Ročný chod odchýlok mesačných priemerov teploty vzduchu za obdobie 1951-1980 od ich ročného priemeru za to isté obdobie pre 6 uzlových bodov modelu CCCMprep a pre územný teplotný priemer v SR; z grafu je vidieť ročnú amplitúdu a posun ročného chodu mesačných teplotných normálov ako aj iné rozdiely medzi uzlovými bodmi a územným priemerom teploty vzduchu v SR (tento graf je možné považovať za jednu z možností testovania kontrolných radov modelového výstupu).



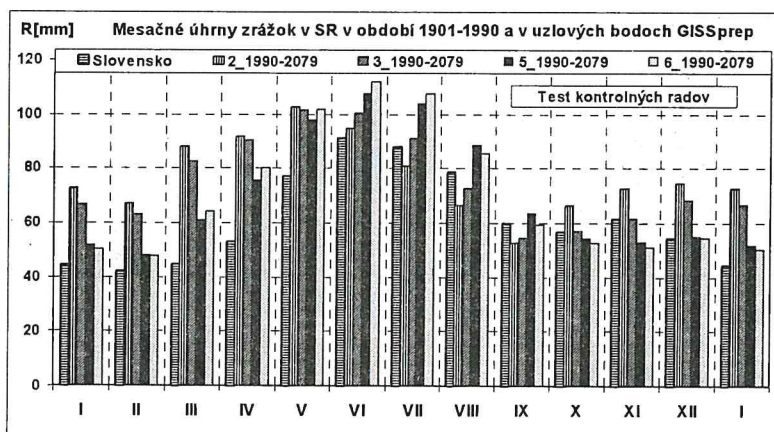
Obr. 8 Ročný chod odchýlok mesačných priemerov teploty vzduchu za obdobie 1951-1980 od územného priemeru pre SR pre 6 uzlových bodov modelu CCCMprep za to isté obdobie; z grafu je vidieť značne teplejšiu klímu vo výstupoch modelu CCCMprep v chladnom polroku v južne a západne ležiacich uzlových bodoch a v druhej polovici leta iba v južne ležiacich bodoch ako aj iné rozdiely medzi uzlovými bodmi a územným priemerom teploty vzduchu v SR.



Obr. 9 Ročný chod odchýlok mesačných priemerov teploty vzduchu za obdobie 1951-1980 od územného priemeru pre SR pre 4 uzlové body modelu GISSprep za to isté obdobie; z grafu je vidieť značne teplejšiu klímu vo výstupoch modelu GISSprep v chladnom polroku v južne a západne ležiacich uzlových bodoch; model GISSprep dáva o niečo reálnejšiu kontrolnú teplotnú klímu ako model CCCMprep.



Obr. 10 Ročný chod mesačných úhrnov zrážok za obdobie 1901-1990 pre 6 uzlových bodov modelu CCCMprep a pre územný priemer zrážok v SR (z 203 staníc); z grafu je vidieť posun letného maxima z júla na máj a zvýraznenie decembrového maxima pri južne ležiacich bodoch 1, 2 a 3; posun maxima z júla na jún je pri severne ležiacich bodoch iba pre najzápadnejší bod 4; charakter jesenného podružného maxima a minima zrážok je pri južne ležiacich bodoch blízky pozorovanej zrážkovej klíme, pri severne ležiacich bodoch je pri bodoch 4 a 5 maximum posunuté až na január.



Obr. 11 Ročný chod mesačných úhrnov zrážok za obdobie 1901-1990 pre 4 uzlové body modelu GISSprep a pre územný priemer zrážok v SR (z 203 staníc); z grafu je vidieť posun letného maxima z júla na máj a mierne zvýraznenie decembrového maxima pri južne ležiacich bodoch 2 a 3; úhrny zrážok sú pri modeli GISSprep podstatne bližšie pozorovanej klíme v porovnaní s modelom CCCMprep.

6. REGIONÁLNA MODIFIKÁCIA VÝSTUPOV MODELOV CCCM A GISS PRE SLOVENSKO

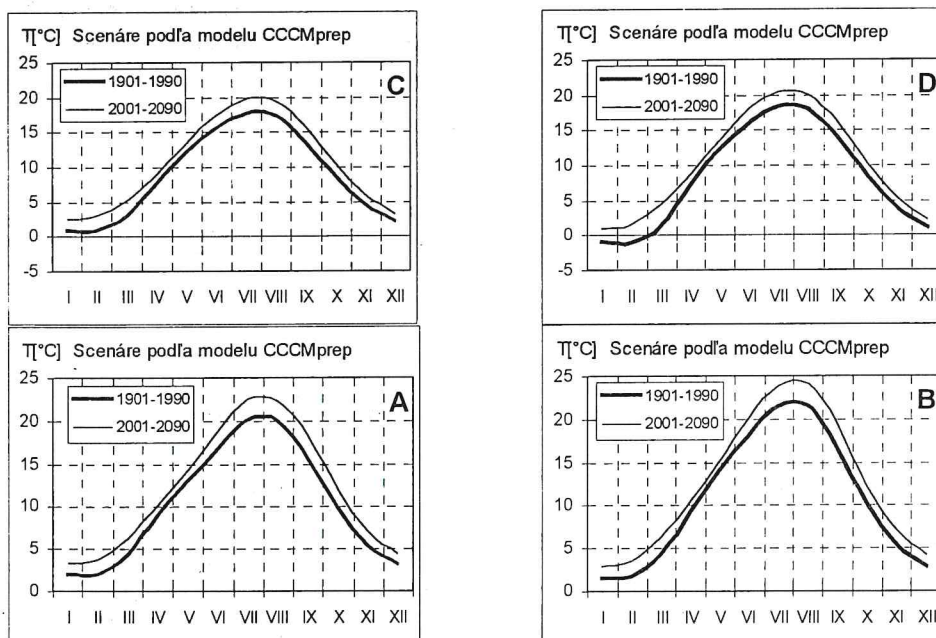
Analýza, prezentovaná v kap. 5, potvrdila pomerne dobrú zhodu pozorovanej klímy s výstupmi modelov CCCMprep a GISSprep pre kontrolnú klímu 4 východnejšie ležiacich uzlových bodov zo 6 v okolí Slovenska. Najzápadnejšie 2 uzlové body (Slovensko a západné Česko) majú už evidentne odlišnú kontrolnú klímu, ktorá sa viac približuje reálnej klíme severného Jadranu, resp. Nemecka, preto sme ich vynechali.

Ako sme uviedli už skôr, cieľom prípravy regionálnych scenárov klimatickej zmeny je poskytnúť užívateľom najpravdepodobnejšie alternatívy budúceho obrazu klímy danej oblasti na analýzu možných dôsledkov očakávanej klimatickej zmeny. Scenáre majú byť alternatívne, čiže by mali pokrývať celú škálu možných zmien. Tieto zmeny zahŕňajú aj zmeny ekonomického a sociálneho správania sa obyvateľstva, ktoré ovplyvňujú koncentráciu skleníkových plynov a aerosólov v atmosfére Zeme. Tak boli pripravené scenáre klimatickej zmeny aj pre Slovensko v rámci medzinárodného projektu U.S. Country Studies Program pre časové horizonty rokov 2010, 2030 a 2075 (Lapin et al., 1995, 1997, Marečková et al., 1997). Pod pojmom časový horizont tu rozumieme skutočnosť, že ide o dlhodobý priemer so stredom v roku charakterizujúcim časový horizont. Pre užívateľov je tiež výhodné, keď dostanú aj detailné scenáre

pre viaceré klimatické prvky a súčasne aj užívateľské pokyny na ich správne používanie alebo aj užívateľské procedúry na ich ďalšiu modifikáciu. Obidva modely, CCCMprep a GISSprep, reprezentujú v našich výsledkoch približne scenáre IS92f, teda rast koncentrácie CO₂ o 1% ročne a rast aerosólov s obsahom síry do roku 2050. Tieto scenáre sa javia ako najpravdepodobnejšie podľa najnovšieho vývoja celosvetových snáh o redukcii emisií GHGs do atmosféry, hoci rast aerosólov skončí asi o niečo skôr.

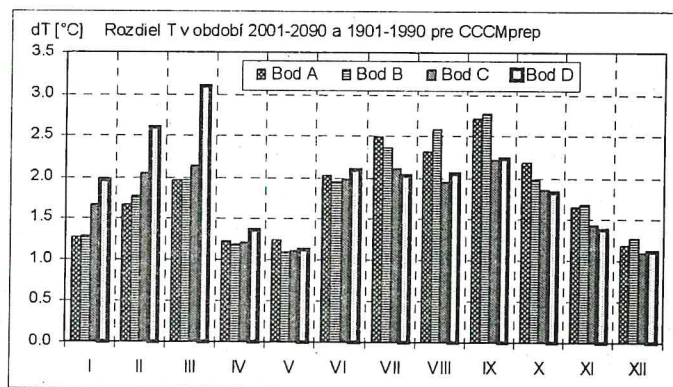
V predchádzajúcej kapitole sme uviedli, že kontrolné výpočty podľa modelov sú v niektorých prípadoch dosť vzdialené pozorovanej klíme v danom období. Vyplýva to zo zjednodušenia zahrnutých do modelov, najmä z podstatne jednoduchšej orografie. Napriek tomu sa dobre zachovávajú niektoré dôležité charakteristiky klimatických radov, čo dáva nádej na použitie modelových výpočtov pomocou GCMs aj pre budúce časové horizonty. Pri konštrukcii scenárov však musíme porovnávať modelové výstupy v časových horizontoch v minulosti a v budúcnosti a nie minulé "pozorované" klímu a budúcu "modelovú" klímu. Najprv sa sústreďme na slovné porovnanie priemerov a variability pri teplote vzduchu, ktorá sa "správa korektnejšie" ako úhrny zrážok (o zmenách variability T a R detailnejšie Lapin et al, 1999).

Pri teplote vzduchu získanej z výstupov CCCMprep sme nezistili závažné zmeny charakteristík variability v celom období 1900-2100 (v zime je slabý pokles a v lete slabý rast smerodajnej odchýlky po roku 2050 oproti obdobiu 1951-2050). Priemery teploty vzduchu postupne rastú od roku 1900 do 1990 takmer v súlade s pozorovaniami. V období 1990-2100 rastú kľzavé 30-ročné aj 50-ročné priemery kontinuálne a vo všetkých uzlových bodoch takmer rovnako – viac v lete a v druhej polovici zimy, menej na jar a koncom jesene. Z obr.25 vidíme, že pri mesačných úhrnoch zrážok majú 30-ročné kľzavé priemery ešte pomerne veľkú premenlivosť, preto sme sa rozhodli aj pre 50-ročné časové horizonty, ktoré porovnáваме s kontrolným radom 1901-1990 pri CCCMprep a iba s 1951-1980 pri GISSprep. Dve metódy použitia kontrolných radov zvyšujú alternatívnosť výsledných scenárov. V prvom kroku boli vypočítané scenáre zmien jednotlivých prvkov pre uzlové body po mesiacoch roka a pre 30-ročné časové horizonty 2010, 2030 a 2075 (tab.3). Ročný chod týchto zmien (kvocientov) sme potom zhladili (tab.4) podľa vzťahu $x_i' = (x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1})/4$. Zachoval sa tým ročný chod a ročná suma odchýlok a odstránili sa náhle "skoky" odchýlok a kvocientov od mesiaca k mesiacu v ročnom chode ako vidíme v tab.3. Podobný postup "hľadania" sme zvolili aj pri konštrukcii scenárov v roku 1995. Korektnosť takéhoto postupu vyplýva aj z porovnania 90-ročných priemerov teploty vzduchu pre jednotlivé uzlové body na obr.12-14.

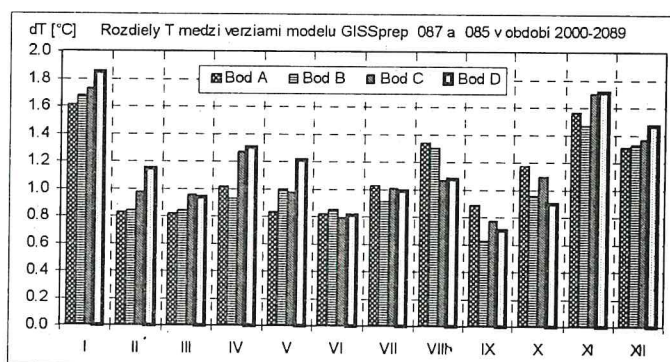


Obr. 12 Priemery teploty vzduchu v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep za obdobie 1901-1990 (hrubšia čiara) a 2001-2090 (tenšia čiara), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.

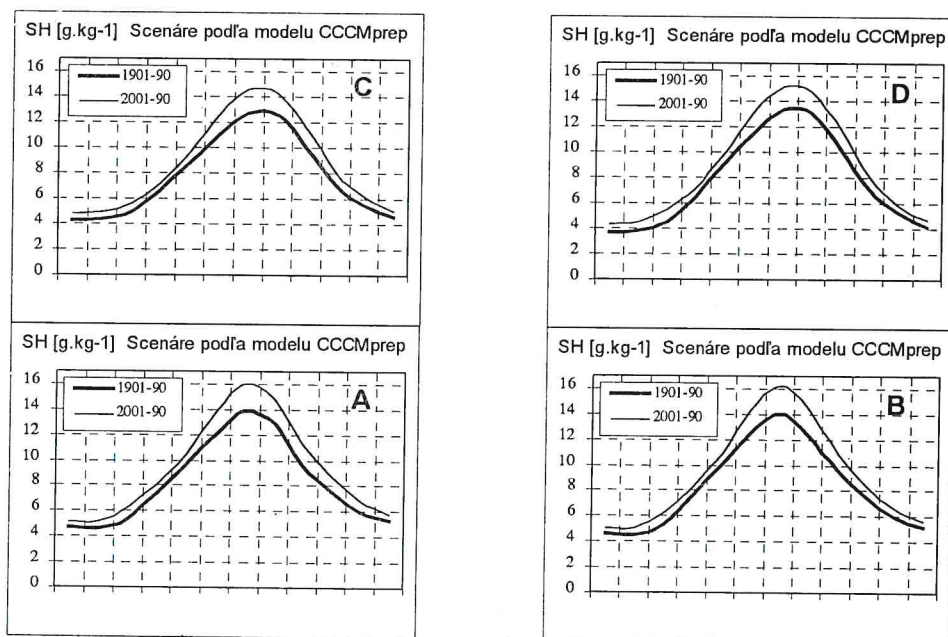
Pri podrobnejšej analýze sa ukázali 30-ročné horizonty ako krátke a keďže sa pre CCCMprep odporúča obdobie 1901-1990 ako kontrolné, použili sme v ďalšom spracovaní 50-ročné horizonty 2010, 2030 a 2075. V tab.5 uvádzame ako príklad CCCMprep scenáre odchýlok priemerov teploty vzduchu v 50-ročných časových horizontoch okolo stredov v rokoch 2010, 2030 a 2075 na 4 staniciach na Slovensku v



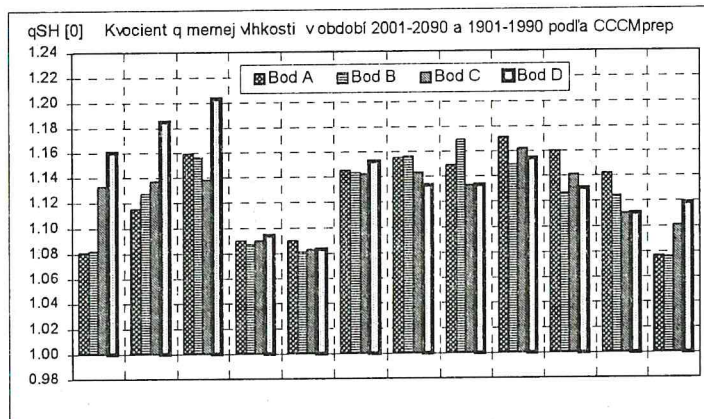
Obr. 13 Odchýlky priemernej teploty vzduchu v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep (T za obdobie 2001-2090 - T za 1901-1990), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.



Obr. 14 Odchýlky priemernej teploty vzduchu v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu GISSprep (T za modelové obdobie 2000-2089, verzia 087 - T za kontrolné obdobie 2000-2089, verzia 085), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.



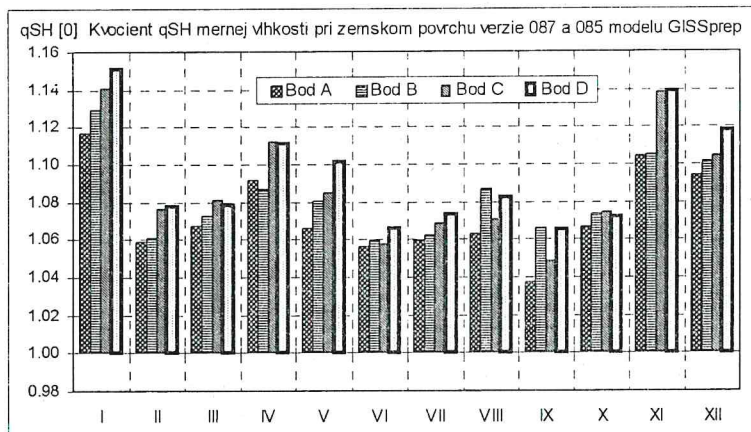
Obr. 15 Priemery mernej vlhkosti vzduchu v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep za kontrolné obdobie 1901-1990 (hrubšia čiara) a modelové obdobie 2001-2090 (tenšia čiara), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.



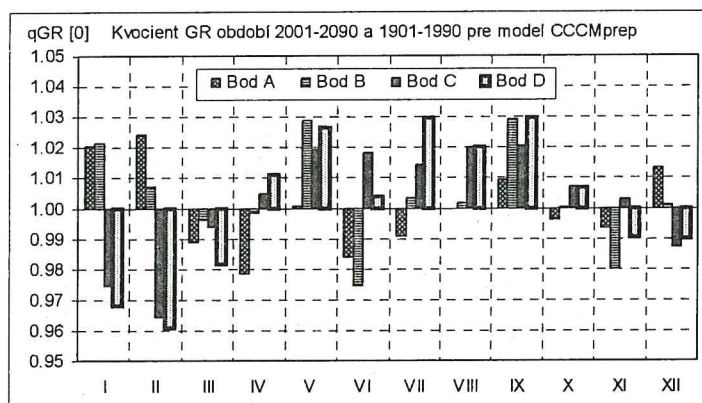
Obr. 16 Kvocienty mernej vlhkosti vzduchu v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep (SH za modelové obdobie 2001-2090 ku SH za kontrolné obdobie 1901-1990), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.

porovnaní s priemerom obdobia 1901-1990. Konzistentnosť scenárov teploty vzduchu založených na výstupoch modelu CCCMprep dosiahneme tak, že priemery v 50-ročných časových horizontoch porovnáваме s priermi 1901-1990 vypočítanými tiež z výstupov modelu CCCMprep. Výpočet scenárov pre jednotlivé stanice v SR sme robili metódou lineárnej interpolácie z hodnôt v uzlových bodoch 2, 3, 5 a 6 (A, B, C, D). Vynechali sme teda najzápadnejšie body 1 a 4, v ktorých má teplota vzduchu nielen menšiu ročnú amplitúdu mesačných priemerov, ale aj menšiu variabilitu mesačných priemerov ako v bodoch východnejšie položených, a tiež sú tieto charakteristiky teploty vzduchu podstatne menšie ako podľa priamych meteorologických pozorovaní. Je zreteľne vidieť, že priestorový gradient teplotných scenárov je veľmi malý, preto navrhujeme použitie jedného scenára pre celé Slovensko. Alternatíva teplotného scenára pre porovnanie s normálovým obdobím 1951-80 ale primárne vypočítaného pre porovnanie s obdobím 1901-1990 bola opravená pre každý mesiac zvlášť (tab.2 a 6a).

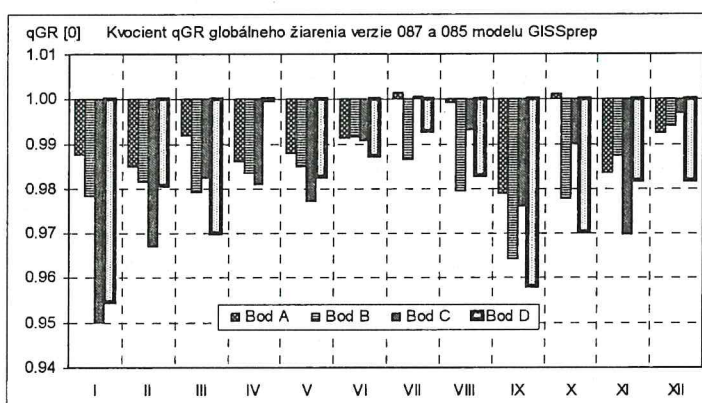
Pri modeli GISSprep sme postupovali trochu odlišnou metódou, pretože kontrolná klíma sa tu vzťahuje na stav CO₂ a aerosólov v roku 1989. Pri časovom horizonte 2010 sme použili len 40-ročný priemer (1990-2029) a pri 2030 a 2075 už 50-ročné priemery kontrolných a modelových radov GISSprep. Pretože okolo roku 1989 ešte máme iba 20-ročný rad pozorovanej klímy (1980-1999), pri korekcii na rady 1951-1980 a 1901-1990 sme použili iba odchýlky ročných priemerov teploty vzduchu pre každý mesiac (mesačné priemery majú tu ešte príliš veľkú premenlivosť, tab.2). Výstupy modelu GISSprep sme modifikovali ďalej rovnako ako pri CCCMprep a tiež navrhujeme použiť jeden scenár zmien mesačných priemerov teploty vzduchu pre celé Slovensko (tab.6a). Podobne sme postupovali aj pri modifikácii scenárov globálneho žiarenia (GR) a mernej vlhkosti vzduchu (SH), tu sú však značné problémy so spoľahlivými kontrolnými radmi pozorovanej klímy pre všetky obdobia od 1901 do 1999. K dispozícii sú najvyššie údaje z Hurbanova (tab.2, 6c,d, 7c,d, obr.15 až 19) a použiť sa dajú aj z Viedne, Hohe Warte. Pri scenároch GR a SH sme považovali rozdiely SS a TP medzi obdobiami za nevýznamné (detaily v tab.2).



Obr. 17 Kvocienty mernej vlhkosti vzduchu (SH) v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu GISSprep (SH za modelové obdobie 2000-2089, verzia 087 ku SH za kontrolné obdobie 2000-2089, verzia 085), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.



Obr. 18 Kvocienty hustoty toku globálneho žiarenia (GR) v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep (GR za modelové obdobie 2001-2090 ku GR za kontrolné obdobie 2001-2090), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.



Obr. 19 Kvocienty hustoty toku globálneho žiarenia v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu GISSprep (GR za modelové obdobie 2000-2089, verzia 087 ku GR za kontrolné obdobie 2000-2089, verzia 085), hodnoty nie sú modifikované podľa meraní GR v kontrolnom období.

Tab. 3 Zmeny (kvocienty) klimatických prvkov priamo z výstupov modelu CCCMprep pre 30-ročné horizonty 2010, 2030 a 2075 v porovnaní s obdobím 1951-1980 lineárne interpolované do stredu SR a bez ďalšej modifikácie (T - priemery teploty vzduchu, R - úhrny zrážok, GR - globálne žiarenie, SHZ - merná vlhkosť vzduchu pri zemskom povrchu, SHV - merná vlhkosť vzduchu pre 850 hPa)

Nepoužívať	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
T 2010	0,88	0,43	1,26	0,94	-0,29	0,93	1,05	1,16	0,87	1,16	1,31	0,83	0,88
T 2030	1,28	1,38	1,91	0,98	0,28	1,57	1,35	1,46	1,54	1,73	1,40	1,37	1,35
T 2075	2,72	2,77	3,32	1,78	1,99	2,88	3,52	3,70	3,80	3,06	3,14	2,16	2,90
R 2010	0,978	0,974	1,082	1,030	0,947	1,185	0,959	0,877	0,860	0,943	1,132	0,993	1,001
R 2030	1,027	1,024	1,101	1,087	0,996	1,215	0,953	0,933	0,910	0,979	1,257	1,024	1,038
R 2075	1,154	1,196	1,060	1,037	0,992	0,990	0,884	0,982	0,846	0,917	1,287	1,213	1,035
GR 2010	1,007	1,014	0,975	0,992	1,043	0,974	1,023	1,033	1,018	0,995	0,990	1,024	1,009
GR 2030	1,010	0,994	0,980	0,997	1,042	0,987	1,018	1,020	1,011	1,010	0,989	1,022	1,009
GR 2075	0,995	0,986	0,991	1,000	1,021	1,016	1,037	1,007	1,018	1,029	0,963	0,989	1,011
SHZ 2010	1,050	1,032	1,100	1,064	0,984	1,072	1,070	1,081	1,048	1,077	1,116	1,062	1,062
SHZ 2030	1,082	1,094	1,121	1,069	1,024	1,122	1,104	1,116	1,099	1,125	1,125	1,116	1,099
SHZ 2075	1,201	1,184	1,231	1,131	1,149	1,206	1,227	1,228	1,232	1,209	1,251	1,177	1,204
SHV 2010	1,056	1,041	1,113	1,039	0,968	1,085	1,071	1,065	1,050	1,064	1,105	1,047	1,058
SHV 2030	1,078	1,107	1,117	1,055	1,009	1,128	1,108	1,108	1,105	1,099	1,133	1,087	1,095
SHV 2075	1,219	1,193	1,195	1,091	1,133	1,201	1,237	1,263	1,261	1,206	1,278	1,217	1,212

Tab. 4 Scenáre zmien T a kvocientov ostatných klimatických prvkov z výstupov modelu CCCMprep pre 30-ročné horizonty 2010, 2030 a 2075 v porovnaní s obdobím 1951-1980 lineárne interpolované do stredu SR so zhladeným ročným chodom podľa vzťahu $x_i' = (x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1})/4$ (CCCMprep30 sú najjednoduchšie konzistentné scenáre pre porovnávacie obdobie 1951-1980, ostatné vysvetlivky sú v tab.3)

CCCMprep30	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
T 2010	0,76	0,75	0,97	0,71	0,32	0,66	1,05	1,06	1,01	1,12	1,15	0,96	0,88
T 2030	1,33	1,49	1,55	1,04	0,78	1,19	1,43	1,45	1,57	1,60	1,48	1,35	1,35
T 2075	2,59	2,90	2,80	2,22	2,16	2,82	3,40	3,68	3,59	3,27	2,88	2,54	2,90
R 2010	0,981	1,002	1,042	1,022	1,027	1,069	0,995	0,893	0,885	0,969	1,050	1,024	1,001
R 2030	1,026	1,044	1,078	1,068	1,073	1,095	1,013	0,932	0,933	1,031	1,129	1,083	1,038
R 2075	1,179	1,151	1,088	1,031	1,003	0,964	0,935	0,924	0,898	0,992	1,176	1,217	1,035
GR 2010	1,013	1,003	0,989	1,001	1,013	1,004	1,013	1,026	1,016	0,999	1,000	1,011	1,009
GR 2030	1,009	0,994	0,987	1,004	1,017	1,009	1,011	1,017	1,013	1,005	1,003	1,011	1,009
GR 2075	0,991	0,989	0,992	1,003	1,015	1,023	1,024	1,017	1,018	1,010	0,986	0,984	1,011
SHZ 2010	1,049	1,053	1,074	1,053	1,026	1,050	1,073	1,070	1,064	1,080	1,093	1,073	1,062
SHZ 2030	1,093	1,098	1,101	1,071	1,060	1,093	1,112	1,109	1,110	1,119	1,123	1,110	1,099
SHZ 2075	1,191	1,200	1,194	1,160	1,159	1,197	1,222	1,229	1,225	1,225	1,222	1,201	1,204
SHV 2010	1,050	1,063	1,076	1,040	1,015	1,052	1,073	1,063	1,057	1,071	1,080	1,064	1,058
SHV 2030	1,088	1,102	1,099	1,059	1,050	1,093	1,113	1,107	1,104	1,109	1,113	1,096	1,095
SHV 2075	1,212	1,200	1,169	1,128	1,139	1,193	1,235	1,256	1,248	1,238	1,245	1,232	1,212

Tab. 5. Scenáre zmien priemernej mesačnej teploty vzduchu podľa modelu CCCMprep v °C (k horizontu 1901-1990) pre stanice na Slovensku a 50-ročné časové horizonty so stredom v rokoch 2010, 2030 a 2075. Scenáre boli skonštruované lineárnou interpoláciou údajov v uzlových bodoch a majú zhladený ročný chod podľa vzťahu $x_i' = (x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1})/4$ (používať ako verziu CCCMprep90)

CCCM prep90	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Hurbanovo												
2010	0,72	0,87	0,95	0,65	0,48	0,80	1,06	1,11	1,09	1,05	0,91	0,75
2030	1,09	1,41	1,50	1,07	0,88	1,28	1,56	1,60	1,62	1,41	1,09	0,95
2075	2,39	2,98	2,87	2,32	2,43	3,13	3,60	3,83	3,80	3,19	2,40	2,03
Oravská Lesná												
2010	0,78	0,99	1,06	0,70	0,51	0,82	1,04	1,05	1,04	1,01	0,85	0,71
2030	1,15	1,49	1,57	1,11	0,90	1,29	1,52	1,53	1,55	1,37	1,04	0,94
2075	2,54	3,15	2,94	2,31	2,36	2,99	3,38	3,54	3,53	3,03	2,34	2,07
Košice												
2010	0,78	0,98	1,05	0,69	0,50	0,81	1,05	1,08	1,07	1,02	0,88	0,74
2030	1,17	1,51	1,60	1,12	0,89	1,28	1,53	1,58	1,60	1,39	1,07	0,98
2075	2,51	3,19	3,04	2,37	2,41	3,08	3,52	3,73	3,68	3,11	2,37	2,06
Medzilaborce												
2010	0,86	1,10	1,17	0,75	0,52	0,83	1,04	1,05	1,04	0,99	0,84	0,74
2030	1,26	1,64	1,72	1,19	0,91	1,29	1,52	1,55	1,57	1,36	1,05	1,00
2075	2,64	3,41	3,23	2,44	2,40	3,03	3,42	3,59	3,55	3,04	2,34	2,08

Tab. 6a Scenáre zmien mesačných priemerov teploty vzduchu [°C] v 50-ročných horizontoch pre celé Slovensko v porovnaní s normálom 1951-1980 (pre CCCM 1995 vid' Lapin et al, 1995)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
CCCM 1995 (30-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980)												
2010	1,2	1,4	1,4	1,0	0,9	0,9	1,1	1,0	1,1	1,1	0,9	0,9
2030	2,0	2,4	2,3	1,7	1,5	1,6	1,8	1,7	1,9	1,8	1,4	1,5
2075	3,7	4,5	4,3	3,2	2,9	3,0	3,3	3,2	3,6	3,4	2,7	2,8
CCCMprep (50-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980, odvodené z modifikácie pre 1901-1990)												
2010	0,5	0,7	0,9	0,7	0,4	0,6	0,9	1,0	1,0	0,9	0,6	0,4
2030	0,9	1,2	1,4	1,1	0,8	1,1	1,4	1,5	1,6	1,2	0,7	0,7
2075	2,2	2,9	2,8	2,3	2,3	2,9	3,4	3,6	3,6	3,0	2,0	1,8

Tab. 6b Scenáre (kvocienty) zmien mesačných úhrnov zrážok v 50-ročných horizontoch priemer pre Slovensko (pre územné priemery zrážok) v porovnaní s normálom 1951-1980 (kvocienty sú bezrozmerné; CCCM 1995 sú scenáre pripravené v Country Study v roku 1995 podľa starej verzie výstupov, tu je uvedený priemer pre celé Slovensko, Lapin et al., 1995)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
CCCM 1995 (30-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980)												
2010	1,09	1,02	1,03	1,02	0,96	0,97	0,94	0,99	0,97	1,04	1,06	1,08
2030	1,16	1,04	1,06	1,03	0,94	0,94	0,91	0,99	0,94	1,07	1,10	1,14
2075	1,30	1,07	1,10	1,06	0,88	0,88	0,82	0,98	0,90	1,13	1,20	1,26
CCCMprep (50-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980, odvodené z modifikácie pre 1901-1990)												
2010	1,02	0,97	1,08	0,98	1,07	0,93	0,92	0,93	1,04	1,08	1,08	1,03
2030	1,05	0,99	1,12	1,04	1,11	0,94	0,92	0,93	1,05	1,10	1,11	1,06
2075	1,24	1,13	1,16	1,02	1,07	0,87	0,87	0,93	1,02	1,09	1,18	1,22

Tab. 6c Scenáre (kvocienty) zmien mesačných priemerov mernej vlhkosti vzduchu [g.kg^{-1}] (kvocienty sú bezrozmerné) v 50-ročných horizontoch pre celé Slovensko v porovnaní s normálom 1951-1980 (a - na hladine 850 hPa, b - pri povrchu zeme v nadmorskej výške asi 500 m, v priblížení je možné použiť aj pre parciálny tlak vodnej pary [hPa], 50-ročný horizont 2075 je z obdobia 2051-2100 atď.)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
CCCMprep (50-ročné horizonty v porovnaní 1951-1980, odvodené z modifikácie pre 1901-1990)												
2010a	1,05	1,04	1,08	1,03	1,04	1,04	1,08	1,07	1,07	1,07	1,04	1,05
2030a	1,08	1,08	1,11	1,06	1,07	1,07	1,12	1,10	1,10	1,10	1,06	1,07
2075a	1,22	1,19	1,18	1,13	1,17	1,19	1,25	1,25	1,25	1,23	1,18	1,20
2010b	1,03	1,02	1,08	1,04	1,05	1,02	1,07	1,07	1,08	1,08	1,03	1,02
2030b	1,06	1,05	1,12	1,07	1,08	1,06	1,11	1,10	1,11	1,10	1,04	1,05
2075b	1,17	1,17	1,22	1,16	1,19	1,18	1,23	1,22	1,24	1,22	1,14	1,13

Tab. 6d Scenáre (kvocienty) zmien mesačných priemerov globálneho žiarenia v 50-ročných horizontoch pre stred Slovenska v porovnaní s normálom 1951-1980 (kvocienty sú bezrozmerné, 50-ročný horizont 2075 je z obdobia 2051-2100 atď.; tu je použitá verzia modifikácie pre 1901-1990 bez korekcie)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
SR, CCCMprep (50-ročné horizonty v porovnaní 1951-1980, z modifikácie pre 1901-1990)												
2010	1,001	0,997	0,995	1,006	1,011	1,001	1,005	1,015	1,010	0,999	0,997	1,001
2030	1,002	0,995	0,994	1,004	1,009	0,998	1,001	1,013	1,012	1,004	1,003	1,006
2075	0,978	0,979	0,993	1,007	1,011	1,012	1,008	1,009	1,015	1,005	0,988	0,981

Tab. 7a Scenáre zmien mesačných priemerov teploty vzduchu [$^{\circ}\text{C}$] v 50-ročných horizontoch pre celé Slovensko v porovnaní s normálom 1951-1980 (GISS 1995 sú scenáre pripravené v Country Study v roku 1995 podľa starej verzie výstupov, Lapin et al., 1995)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
GISS 1995 (30-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980)												
2010	1,8	1,7	1,6	1,2	1,0	0,8	0,8	0,8	1,2	1,4	1,5	1,6
2030	3,0	2,9	2,7	2,1	1,7	1,4	1,3	1,3	1,9	2,4	2,5	2,7
2075	5,7	5,4	5,0	3,9	3,2	2,6	2,4	2,4	3,6	4,5	4,7	5,1
GISSprep (50-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980)												
2010	0,3	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5
2030	1,2	1,0	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,9	1,2	1,2
2075	2,7	2,4	2,3	2,2	1,9	1,8	2,1	2,4	2,3	2,3	2,6	2,8

Tab. 7b Scenáre (kvocienty) zmien mesačných úhrnov zrážok v 50-ročných horizontoch priemer pre Slovensko (pre územné priemery zrážok) v porovnaní s normálom 1951-1980 (kvocienty sú bezrozmerné; GISS 1995 sú scenáre pripravené v Country Study v roku 1995 podľa starej verzie výstupov, tu je uvedený priemer pre celé Slovensko, Lapin et al., 1995)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
GISS 1995 (30-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980)												
2010	1,05	1,09	1,08	1,10	1,06	1,02	1,05	1,05	0,94	1,09	1,09	1,02
2030	1,08	1,14	1,14	1,16	1,09	1,04	1,08	1,08	0,90	1,14	1,15	1,03
2075	1,16	1,27	1,26	1,30	1,18	1,07	1,16	1,15	0,81	1,27	1,30	1,05
GISSprep (50-ročné horizonty v porovnaní s 1951-1980)												
2010	0,98	0,97	0,98	1,01	1,02	1,00	0,98	1,02	1,06	1,03	1,00	1,00
2030	0,96	0,98	1,00	1,01	1,02	1,01	0,98	1,02	1,07	1,03	0,98	0,96
2075	1,18	1,16	1,10	1,07	1,05	0,99	0,97	0,98	1,02	1,05	1,05	1,10

Tab. 7c Scenáre (kvocienty) zmien mesačných priemerov mernej vlhkosti vzduchu [g.kg^{-1}] (kvocienty sú bezrozmerné) v 50-ročných horizontoch pre celé Slovensko v porovnaní s normálom 1951-1980 (a - na hladine 850 hPa, b - pri povrchu zeme v nadmorskej výške asi 500 m, v priblížení je možné použiť aj pre parciálny tlak vodnej pary [hPa], 50-ročný horizont 2075 je z obdobia 2051-2100 atď.).

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
GISSprep (50-ročné horizonty v porovnaní 1951-1980)												
2010a	1,01	1,01	1,03	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,05	1,05	1,04	1,03
2030a	1,06	1,05	1,05	1,07	1,07	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
2075a	1,20	1,19	1,17	1,17	1,15	1,13	1,16	1,18	1,18	1,18	1,19	1,20
2010b	1,00	1,00	1,03	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,02
2030b	1,07	1,06	1,05	1,07	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05	1,07	1,08	1,08
2075b	1,23	1,21	1,20	1,19	1,16	1,13	1,14	1,16	1,15	1,17	1,21	1,23

Tab. 7d Scenáre (kvocienty) zmien mesačných priemerov globálneho žiarenia v 50-ročných horizontoch pre stred Slovenska v porovnaní s normálom 1951-1980 (kvocienty sú bezrozmerné, 50-ročný horizont 2075 je z obdobia 2051-2100 atď.; tu je použitá základná verzia modifikácie bez korekcie)

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
GISSprep (50-ročné horizonty v porovnaní 1951-1980)												
2010	1,004	1,015	1,006	0,992	0,994	0,997	0,994	0,987	0,980	0,982	0,987	0,992
2030	1,002	0,995	0,990	0,988	0,990	0,992	0,992	0,987	0,983	0,987	0,991	1,000
2075	0,937	0,949	0,974	0,984	0,980	0,988	0,997	0,985	0,970	0,966	0,968	0,954

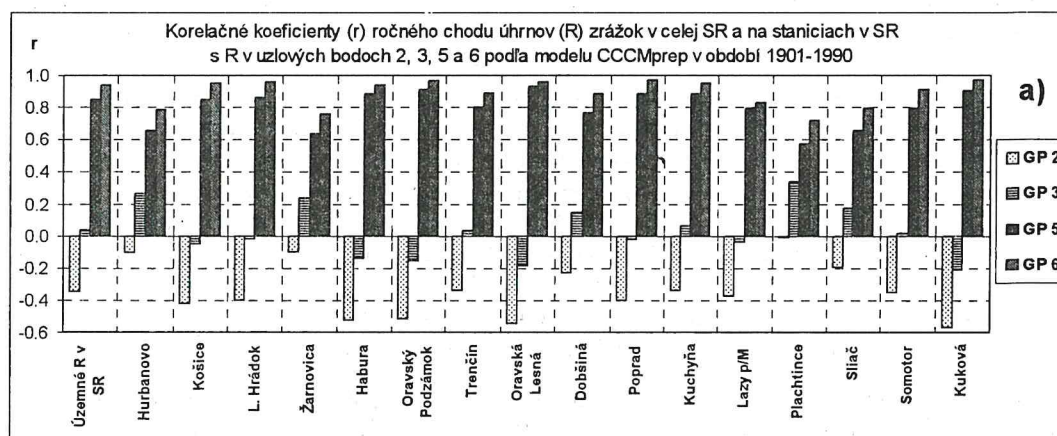
Pri úhrnoch zrážok neodporúčame použiť jednotný scenár pre celé územie Slovenska, pretože je na Slovensku zreteľne badateľná zmena ročného chodu (režimu) úhrnov zrážok od juhu na sever a od západu na východ (obr.9). Táto zmena nie je rovnomerná v priestore, čo súvisí s rozdielnou citlivosťou jednotlivých lokalít na stredomorské, oceánické a vnútrozemské vplyvy na režim zrážok. Hlavnou príčinou rozdielného podielu uvedených troch vplyvov je expozícia lokality na prevládajúce atmosférické prúdenie ako aj náveterné a zátveterné efekty širšieho rozsahu. Táto skutočnosť sa zreteľne odráža aj na ročnom režime zrážok v použitých uzlových bodoch. Pretože režim zrážok v najzápadnejších uzlových bodoch 1 a 4 je najviac vzdialený a v najvýchodnejších bodoch 3 a 6 najbližší zrážkovému režimu na Slovensku (obr.10), použili sme pri regionálnej interpretácii výstupov CCCMprep tiež iba uzlové body 2, 3, 5 a 6. Podobne sme postupovali aj v prípade výstupov GISSprep (obr.11). Podobnosť režimu zrážok sme testovali koreláciou ročného chodu úhrnov zrážok (január až január, 13 mesiacov) vo všetkých uzlových bodoch s ročným chodom v SR a na 15 staniciach na Slovensku v období 1901-1990 (obr. 25a,b).

Korelačné koeficienty $|r| \geq 0,5$ vyjadrujú v tomto prípade určite pomerne dobrú zhodu s daným alebo opačným ročným chodom úhrnov zrážok. Dá sa jednoznačne tvrdiť, že ročný chod zrážok v uzlových bodoch 5 a 6 najtesnejšie koreluje s meranými úhrnmi na staniciach na severe Slovenska. Na staniciach s posunutým maximom k jari a k jeseni sa dosiahla pri CCCMprep vyššia korelácia s bodom 3 a nižšia korelácia s bodmi 5 a 6 (Hurbanovo, Plachtince, Žarnovica). S bodom 2 majú severné stanice pri CCCMprep takmer opačnú koreláciu (opačný ročný chod). Výstupy modelu GISSprep majú oveľa menej výrazne vyjadrený stredomorský typ ročného chodu pri južných uzlových bodoch, no napriek tomu sú výsledky korelačnej analýzy porovnateľné. To je zrejme jedna z možností ako oceniť možný vplyv režimu zrážok v spomenutých 4 uzlových bodoch na režim zrážok na staniciach na Slovensku. Nech je priemerná interpolačná váha dvoch severných bodov k priemernej interpolačnej váhe dvoch južných bodov približne v pomere 1,50 pri CCCMprep a 1,56 pri GISSprep (na všetkých 15 staniciach Slovenska v priemere) tak, ako to vyplýva z priemernej váhy vypočítanej podľa geometrickej vzdialenosti pri lineárnej interpolácii do stredu SR. Potom spracovaním korelácie ročného chodu zrážok dostaneme vzťahy na výpočet interpolačných váh (V) jednotlivých uzlových bodov pre stanice v SR takto: pre južné body 2 a 3, je $V_j = 5 \cdot (r + 0,5)$ a pre dva severné body $V_s = 5 \cdot (r - 0,3)$ pri CCCMprep a $V_j = 5 \cdot (r + 0,07)$ pre južné a $V_s = 5 \cdot (r - 0,2)$ pre dva severné body pri GISSprep. Konštantou 5, ktorou násobíme vzťahy iba dosiahneme "lepši" numerický tvar váh jednotlivých uzlových bodov. Touto modifikovanou metódou sme získali numerické hodnoty váh uzlových bodov na kvantitatívne posúdenie veľkosti vplyvu stredomorského (južné uzlové body 2 a 3) a vnútrozemského (severné uzlové body 5 a 6) ročného chodu zrážok na staniciach v SR, ktorá sa dá opakovane použiť aj pre iné stanice a iné obdobia. Rekapitulácia interpolačných váh je v tab.8. Spracované scenáre zrážok sú uvedené v tab. 6b, 7b, 9, 10. Analýza ročného chodu zrážkových výstupov modelov CCCMprep a GISSprep v uzlových bodoch 2, 3, 5 a 6 (A, B, C, D) je na obr. 21 až 24.

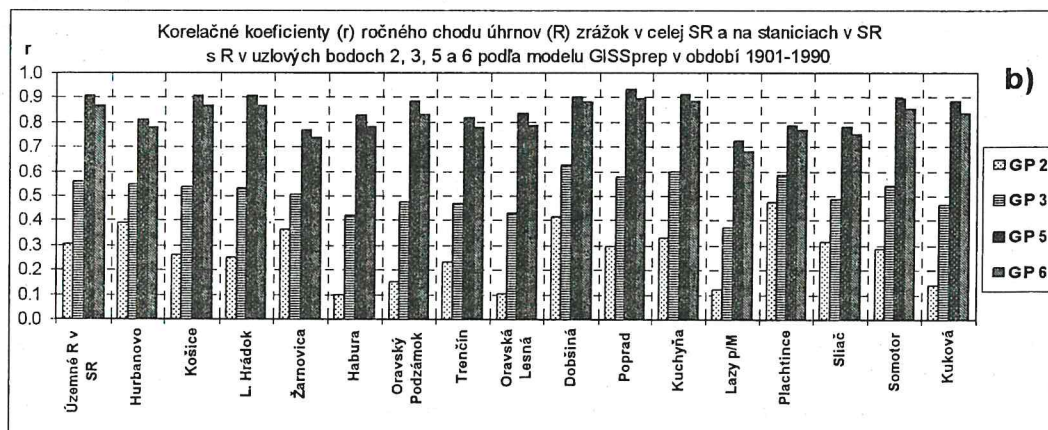
Pozn.: Takouto metódou modifikácie výstupov GCMs získame určitú priestorovú štruktúru kvocientov, ktoré sa pomerne plynulo menia na území SR (tab.10), po zmene porovnávacieho (kontrolného) obdobia z 1901-90 na 1951-80 sa uvedená plynulá zmena poruší (tab.9), pretože vzťah mesačných normálov zrážok medzi týmito obdobiami je nepravidelný, na čom sa popri krátkom období 1951-80 podpisuje aj prirodzene veľká priestorová premenlivosť úhrnov zrážok (niekde sú potom kvocienty k obdobiu 1951-80 príliš vysoké (L. Hrádok, tab.9), dodržiavali sme však predovšetkým scenáre úhrnov R v časových horizontoch 2010, 2030 a 2075).

Tab. 8 Hodnoty váh uzlových bodov pri interpolácii do jednotlivých lokalít na Slovensku (Centrum - lineárna interpolácia do stredu SR, Sliač - interpolácia pri zrážkovom scenári do centra SR - Sliač, SR - - interpolácia pri zrážkovom scenári pre územné priemery zrážok v SR, Priemer - priemer váh 15 staníc pri interpolácii zrážkových scenárov, N/S - pomer váh severných uzlových bodov 5 a 6 (C, D) ku južným uzlovým bodom 2 a 3 (A, B).

Model	Poloha	GP-2	GP-3	GP-5	GP-6	N/S
CCCMprep	Centrum	2.0	1.7	3.3	2.2	1.49
CCCMprep	Sliač	1.5	3.4	1.8	2.5	0.88
CCCMprep	SR	0.8	2.7	2.7	3.2	1.69
CCCMprep	Priemer	0.9	2.7	2.5	2.9	1.50
GISSprep	Centrum	2.2	1.7	3.7	2.4	1.56
GISSprep	Sliač	0.7	2.2	2.7	2.5	1.79
GISSprep	SR	1.4	3.0	3.4	3.2	1.50
GISSprep	Priemer	1.2	2.7	3.1	2.9	1.54



Obr. 20a Korelačné koeficienty ročného chodu priemerných mesačných úhrnov zrážok v období 1901-1990 v SR, na 15 staniách v SR a v Kukovej s ročným chodom v použitých 4 uzlových bodoch výstupov CCCMprep (1901-1990); uvedených 15 staníc sa použilo aj pri príprave zrážkových scenárov v roku 1995, Kuková sme zaradili navyše kvôli najvýraznejšiemu kontinentálnemu režimu zrážok v SR.



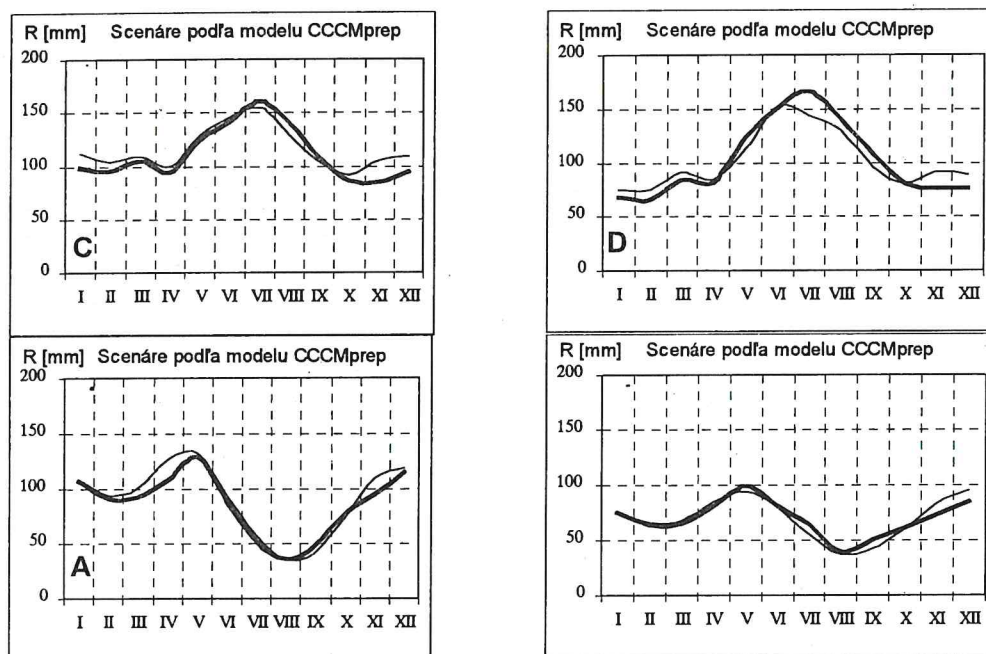
Obr. 20b Korelačné koeficienty ročného chodu priemerných mesačných úhrnov zrážok v období 1901-1990 v SR, na 15 staniách v SR a v Kukovej s ročným chodom v použitých 4 uzlových bodoch výstupov GISSprep (b, kontrolný rad 1990-2079).

Tab. 9 CCCMprep scenáre (kvocienty) zmien mesačných úhrnov zrážok R v SR (stred SR pri lineárnej interpolácii) a na jednotlivých staniciach SR v porovnaní s normálmi 1951-1980 (v 50-ročných horizontoch; všetko odvodené zo základných scenárov v tab.10 podľa prepočtu normálov 1901-90 a 1951-80)); tieto scenáre nie je možné konštruovať pre ďalšie (ani blízke) stanice interpoláciou

SR stred lin.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.028	0.968	1.082	0.997	1.089	0.950	0.935	0.937	1.038	1.079	1.074	1.030	1.008
2030	1.051	0.991	1.124	1.057	1.132	0.966	0.944	0.945	1.052	1.104	1.113	1.061	1.034
2075	1.224	1.118	1.169	1.036	1.074	0.873	0.885	0.940	1.030	1.092	1.177	1.202	1.040
Hurbanovo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.058	1.002	1.212	1.021	1.130	0.906	0.911	0.923	0.972	1.153	1.024	1.137	1.021
2030	1.089	1.028	1.254	1.075	1.167	0.916	0.921	0.936	0.984	1.173	1.058	1.172	1.046
2075	1.246	1.147	1.292	1.042	1.107	0.832	0.870	0.945	0.973	1.161	1.112	1.310	1.056
Košice	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.049	0.997	1.235	1.108	1.017	0.981	0.883	0.924	1.048	1.134	1.107	1.086	1.018
2030	1.079	1.024	1.278	1.172	1.059	0.988	0.877	0.922	1.054	1.155	1.147	1.120	1.038
2075	1.283	1.169	1.332	1.158	1.023	0.911	0.833	0.913	1.019	1.140	1.224	1.291	1.047
L. Hrádok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.153	1.119	1.222	1.035	1.180	0.931	0.964	1.020	1.054	1.038	1.162	1.105	1.057
2030	1.185	1.149	1.265	1.095	1.228	0.938	0.959	1.019	1.060	1.057	1.203	1.140	1.078
2075	1.406	1.311	1.318	1.081	1.185	0.865	0.910	1.010	1.026	1.044	1.283	1.311	1.089
Or. Lesná	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.076	1.026	1.047	0.969	0.959	0.966	0.909	1.057	0.950	1.087	1.138	1.033	1.008
2030	1.105	1.053	1.085	1.028	1.002	0.973	0.898	1.049	0.953	1.108	1.180	1.065	1.028
2075	1.332	1.213	1.136	1.023	0.972	0.901	0.854	1.031	0.914	1.093	1.266	1.240	1.053
Plachtince	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	0.949	0.895	1.120	1.009	1.151	0.923	0.965	0.795	0.987	1.110	1.055	1.031	0.991
2030	0.977	0.919	1.158	1.061	1.185	0.934	0.979	0.809	1.001	1.129	1.089	1.063	1.016
2075	1.106	1.019	1.190	1.023	1.121	0.845	0.924	0.822	0.996	1.119	1.139	1.178	1.022
Habura	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.114	1.028	1.164	1.047	0.993	1.003	0.927	0.965	0.968	1.202	1.109	0.998	1.024
2030	1.145	1.054	1.205	1.110	1.037	1.009	0.916	0.959	0.972	1.225	1.150	1.030	1.044
2075	1.376	1.212	1.260	1.103	1.006	0.935	0.872	0.944	0.934	1.208	1.232	1.197	1.066

Tab. 10 Pôvodné CCCMprep90 scenáre zmien mesačných úhrnov zrážok R v SR (stred SR pri lineárnej interpolácii) v porovnaní s normálmi 1901-1990 (50-ročné horizonty) a na staniciach pri vázenej interpolácii podľa ročného chodu R; scenáre s možnosťou interpolácie kvocientov medzi blízskymi stanicami

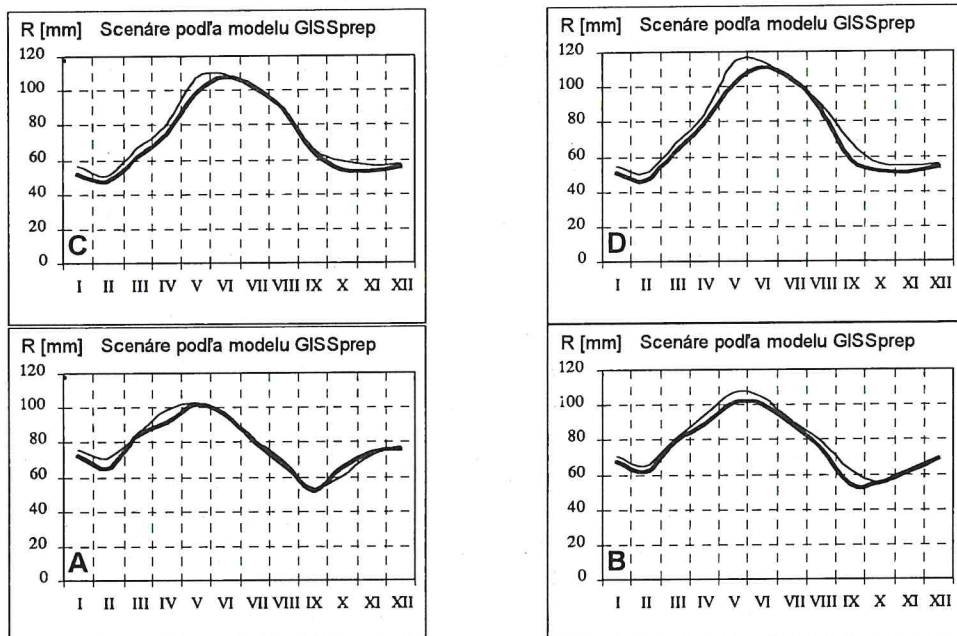
SR stred lin.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.010	1.006	1.016	1.002	0.999	1.019	0.988	0.938	0.943	1.015	1.072	1.050	1.003
2030	1.033	1.030	1.056	1.062	1.039	1.036	0.998	0.946	0.956	1.038	1.111	1.082	1.028
2075	1.203	1.161	1.098	1.041	0.986	0.937	0.936	0.941	0.936	1.028	1.175	1.226	1.035
Hurbanovo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	0.997	0.997	1.017	1.004	0.995	1.008	0.975	0.928	0.931	1.000	1.064	1.042	0.996
2030	1.026	1.023	1.052	1.057	1.028	1.020	0.986	0.941	0.942	1.017	1.099	1.074	1.021
2075	1.174	1.141	1.084	1.025	0.976	0.926	0.931	0.951	0.931	1.007	1.154	1.201	1.031
Košice	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.008	1.006	1.015	0.984	0.975	1.000	0.972	0.934	0.954	1.024	1.077	1.053	0.993
2030	1.037	1.033	1.050	1.040	1.015	1.007	0.965	0.933	0.959	1.043	1.115	1.086	1.013
2075	1.232	1.180	1.095	1.028	0.981	0.930	0.917	0.923	0.927	1.030	1.190	1.251	1.021
L. Hrádok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.007	1.006	1.015	0.985	0.977	1.001	0.973	0.934	0.953	1.023	1.076	1.052	0.994
2030	1.036	1.033	1.050	1.042	1.017	1.009	0.967	0.933	0.959	1.042	1.115	1.085	1.014
2075	1.229	1.178	1.094	1.029	0.981	0.930	0.918	0.925	0.927	1.029	1.189	1.248	1.024
Habura	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.011	1.009	1.014	0.978	0.970	0.999	0.972	0.936	0.961	1.032	1.082	1.056	0.997
2030	1.040	1.036	1.050	1.037	1.014	1.005	0.960	0.930	0.965	1.052	1.121	1.090	1.016
2075	1.249	1.191	1.098	1.030	0.983	0.932	0.914	0.916	0.927	1.038	1.201	1.266	1.038



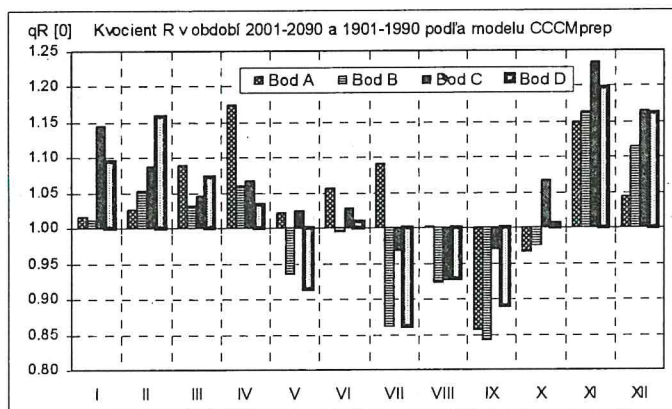
Obr. 21 Priemery úhrnov zrážok v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep za kontrolné obdobie 1901-1990 (hrubšia čiara) a modelové obdobie 2001-2090 (tenšia čiara), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.

Tab. 11 GISSprep scenáre (kvocienty) zmien mesačných úhrnov zrážok R v SR (stred SR pri lineárnej interpolácii) a na jednotlivých staniciach SR (pri váženej interpolácii podľa ročného chodu R) v porovnaní s normálmi 1951-1980 (v 50-ročných horizontoch); tieto scenáre je možné konštruovať pre ďalšie (blízke) stanice aj interpoláciou (ide o pôvodnú modifikáciu výstupov GCMs)

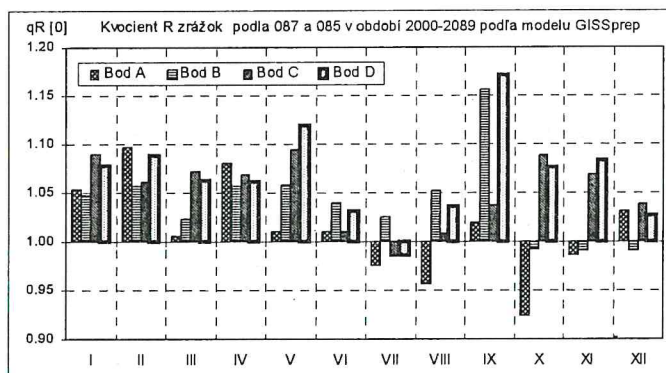
SR stred lin.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
SR 2010	0.98	0.97	0.98	1.01	1.02	1.00	0.98	1.02	1.06	1.03	1.00	1.00	1.00
SR 2030	0.96	0.98	1.00	1.01	1.02	1.01	0.98	1.02	1.07	1.03	0.98	0.96	1.00
SR 2075	1.18	1.16	1.10	1.07	1.05	0.99	0.97	0.98	1.02	1.05	1.05	1.10	1.06
Hurbanovo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	0.980	0.961	0.970	1.002	1.011	0.990	0.973	1.020	1.061	1.014	0.981	0.989	0.993
2030	0.956	0.992	1.013	1.012	1.019	1.012	0.988	1.027	1.082	1.050	0.988	0.955	1.004
2075	1.165	1.147	1.084	1.060	1.038	0.985	0.965	0.980	1.011	1.048	1.057	1.100	1.041
Košice	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	0.973	0.953	0.961	0.992	1.000	0.978	0.961	1.007	1.049	1.006	0.973	0.981	0.983
2030	0.949	0.984	1.005	1.003	1.010	1.002	0.977	1.015	1.072	1.044	0.983	0.948	0.995
2075	1.151	1.134	1.075	1.052	1.031	0.978	0.958	0.974	1.005	1.042	1.051	1.091	1.033
L. Hrádok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.024	1.003	1.011	1.043	1.052	1.029	1.010	1.059	1.104	1.058	1.024	1.032	1.034
2030	0.999	1.036	1.058	1.056	1.063	1.054	1.028	1.068	1.128	1.099	1.035	0.997	1.047
2075	1.210	1.193	1.131	1.107	1.085	1.029	1.008	1.025	1.058	1.096	1.107	1.148	1.087
Or. Lesná	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.035	1.013	1.021	1.054	1.062	1.038	1.019	1.068	1.116	1.070	1.034	1.043	1.044
2030	1.009	1.047	1.069	1.067	1.074	1.065	1.039	1.080	1.142	1.113	1.046	1.008	1.059
2075	1.221	1.204	1.143	1.119	1.097	1.042	1.021	1.038	1.070	1.110	1.120	1.160	1.099
Plachtince	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	0.948	0.930	0.940	0.972	0.980	0.960	0.944	0.989	1.028	0.982	0.950	0.957	0.962
2030	0.926	0.960	0.980	0.980	0.988	0.981	0.958	0.996	1.049	1.016	0.956	0.924	0.973
2075	1.130	1.112	1.050	1.026	1.004	0.954	0.935	0.948	0.978	1.014	1.023	1.066	1.009
Habura	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
2010	1.070	1.045	1.052	1.085	1.092	1.066	1.045	1.097	1.149	1.104	1.066	1.076	1.075
2030	1.042	1.081	1.103	1.101	1.107	1.096	1.070	1.113	1.179	1.152	1.082	1.040	1.092
2075	1.254	1.238	1.178	1.155	1.133	1.077	1.056	1.074	1.108	1.149	1.160	1.197	1.134



Obr. 22 Priemery úhrnov zrážok R v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu GISSprep za kontrolné obdobie 2000-2089 (hrubšia čiara, verzia 085) a modelové obdobie 2000-2089 (tenšia čiara, verzia 087), hodnoty nie sú modifikované podľa meraných R v kontrolnom období.



Obr. 23 Kvocienty úhrnov zrážok v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu CCCMprep (R za modelové obdobie 2001-2090 ku R za kontrolné obdobie 1901-1990), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.



Obr. 24 Kvocienty úhrnov zrážok v uzlových bodoch A a B (2 a 3, juh) a C a D (5 a 6, sever) modelu GISSprep (R za modelové obdobie 2000-2089, verzia 087 ku R za kontrolné obdobie 2000-2089, verzia 085), hodnoty nie sú modifikované podľa empirických údajov v kontrolnom období.

7. SCENÁRE ČASOVÝCH RADOV MESAČNÝCH PRIEMEROV TEPLOTY VZDUCHU (T) A MESAČNÝCH ÚHRNOV ZRÁŽOK (R) PRE VYBRANÉ LOKALITY NA SLOVENSKU V OBDOBÍ 2001-2090

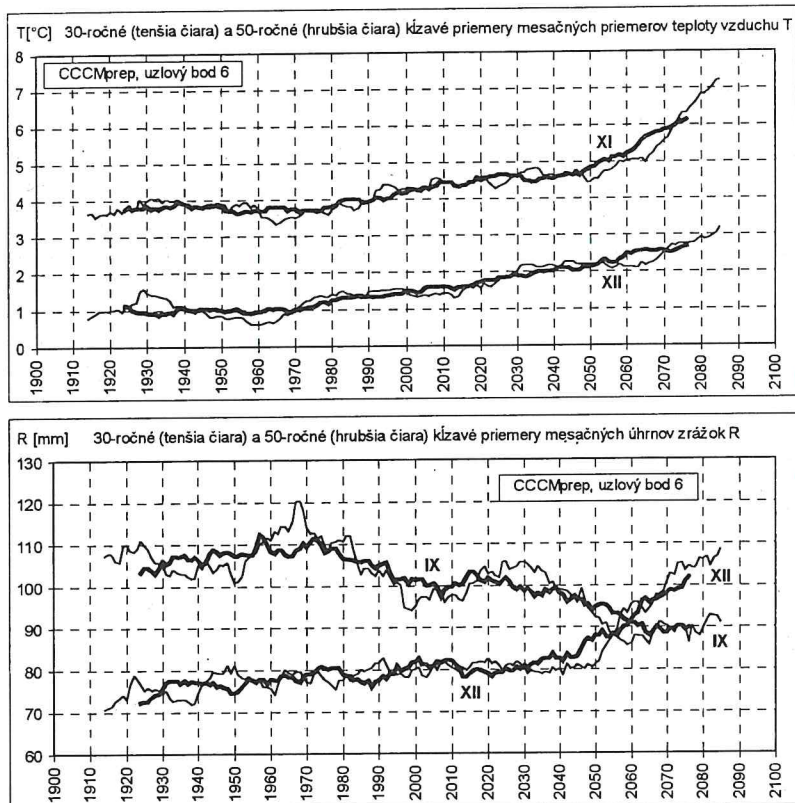
Pre niektoré aplikácie pri hydrologických a iných modelových výpočtoch sa požadujú scenáre časových radov mesačných (prípadne aj denných) klimatických údajov, najmä teploty vzduchu a úhrnov zrážok. Existujú prinajmenšom tri základné metódy na získanie takýchto časových radov: 1. Aplikácia teplotných a zrážkových scenárov priemerov vypočítaných pre jednotlivé časové horizonty na základné klimatické rady z obdobia 1951-1980 (prípadne iného), ktoré môžeme potom použiť ako scenáre pre obdobia 1996-2025, 2016-2045, 2060-2090 ai.; 2. Príprava generovaných (umelých) klimatických radov podľa vopred zvolených štatistických predpokladov - stochastický generátor počasia; 3. Modifikácia výstupov modelov GCMs podľa empiricky získaných radov v čo najdlhšom období v bezprostrednej minulosti podľa čo najširšej škály štatistických parametrov (Lapin et al, 1999 a 2000).

Prvá metóda je najjednoduchšia, najčastejšie sa používa, je najrýchlejšie aplikovateľná a je zrejme, že môže byť v dobrej zhode so skutočnosťou v najbližších desaťročiach. V neskorších desaťročiach však vyžaduje zahrnutie možných zmien variability údajov a odlišného časového priebehu. Použitie stochastického generátora počasia má spoločný nedostatok v tom, že aj keď časové rady jednotlivých klimatických prvkov sú generované v súlade so štatistickými charakteristikami originálnych meraných údajov, nie je možné pomocou nich dosiahnuť fyzikálnu prepojenosť (konzistentnosť, plausibilitu) všetkých klimatických prvkov. To sa dá dosiahnuť iba dynamickými regionálnymi atmosférickými modelmi. Umelé generované rady preto v konečnom dôsledku nesimulujú dost' spoľahlivo celkovú odozvu klimatických podmienok na klimatickú zmenu v priestore a v čase, pri modelových výpočtoch impaktov sa teda môžu objaviť nereálne výsledky.

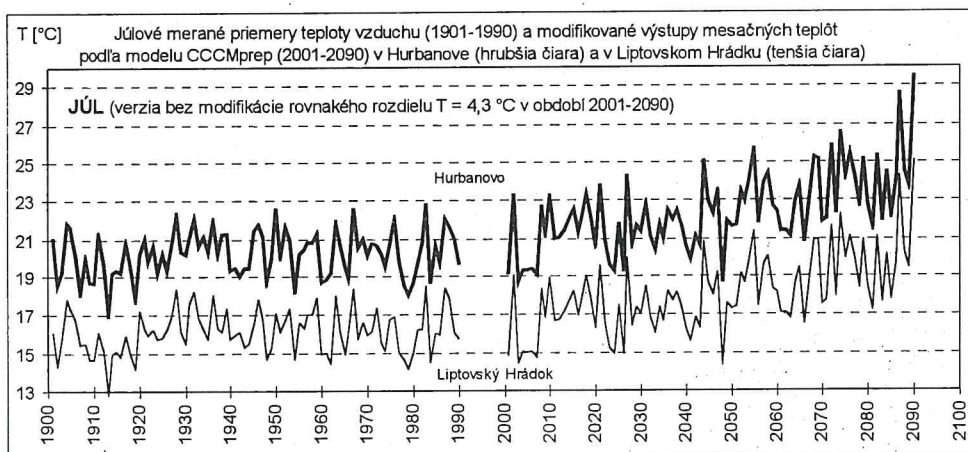
Priame použitie výstupov GCMs ako časových radov nie je možné pri žiadnej aplikácii. Modelové výstupy sú vypočítané za podstatne odlišných predpokladov orografie a majú aj podstatne odlišný ročný chod a variabilitu (najmä v chladnom polroku (X-III) je väčšinou veľmi nízky variačný koeficient (C_v) pri R a nízka smerodajná odchýlka pri T). Výstupy GCMs vyžadujú úpravu dlhodobých priemerov a aj variabilitu niektorou zo štatistických metód tak, aby sa zachovala vnútorná konzistentnosť modelových výstupov. Pritom pod vnútornou konzistentnosťou rozumieme aj vzťah medzi jednotlivými prvkami aj vzťah medzi uzlovými bodmi. Rozpracovanie tohoto problému je predmetom ďalšej etapy riešenia úlohy, výsledkom ktorej bude prezentácia viacerých radov mesačných hodnôt T a R pre obdobie 2001-2090.

Na tomto mieste stručne charakterizujeme výsledky prvej a druhej modifikácie mesačných údajov T a R podľa výstupov CCCMprep a porovnajme ich s empirickými údajmi mesačných priemerov teploty vzduchu z 2 staníc z obdobia 1901-1990 (Obr. 26 a 27, metodiku detailnejšie opísali Lapin et al, 1999 a 2000). Na obr. 25 sa najprv venujeme kľzavým priemerom T a R, vidíme, že popri spomínanej medzi-mesačnej premenlivosti T a R existuje aj výrazný časový trend a pri zrážkach aj pomerne náhle zmeny 30-ročných priemerov. To vnáša do procesu modifikácie výstupov GCMs podľa empirických časových radov viacero problémov. Vo výstupoch GCMs je potrebné modifikovať priemerné hodnoty (väčšinou znížiť) a aj variabilitu (väčšinou zvýšiť). Výsledkom sú nové časové rady mesačných hodnôt T a R, ktoré majú v kontrolnom období (1901-1990) rovnaký priemer, smerodajnú odchýlku pri T a C_v pri R ako empirické rady. Scenáre časových radov pre obdobie 2001-2090 majú upravené priemery a variabilitu rovnakou metodikou ako v kontrolnom období 1901-1990, pričom predpokladáme, že po roku 2000 nedôjde k zásadnému rozporu v charakteristikách variability medzi empirickými a takto modifikovanými časovými radmi.

Uvedeným postupom je možné získať scenáre časových radov pre akúkoľvek lokalitu, pre ktorú máme k dispozícii empirické časové rady pre obdobie 1901-1990. Prvou modifikáciou modelových výstupov sme získali časové rady T a R pre obdobie 2001-2090 s požadovanými štatistickými parametrami, no spoločným nedostatkom bola extrémne malá priestorová variabilita časových radov vyplývajúca z metodiky interpolácie údajov zo 4 uzlových bodov modelu CCCMprep (korelačný koeficient (r) väčšinou nad 0,95). Pri časových radoch T nemá tento nedostatok podstatný význam, pretože aj empirické rady mesačných priemerov majú na Slovensku väčšinou $r > 0,9$, pri časových radoch R je to však nedostatok závažný, pretože je pri nich väčšinou $r < 0,5$ aj pri pomerne blízkych lokalitách. Z uvedených príčin sme pri časových radoch R vniesli do modifikovaných výstupov CCCMprep doplnkovú variabilitu získanú z porovnania empirických radov s časovým radom územných priemerov R pre celé Slovensko v období 1901-1990. Nazvali sme to druhou modifikáciou časových radov a vzorka výsledkov je na obr. 27.



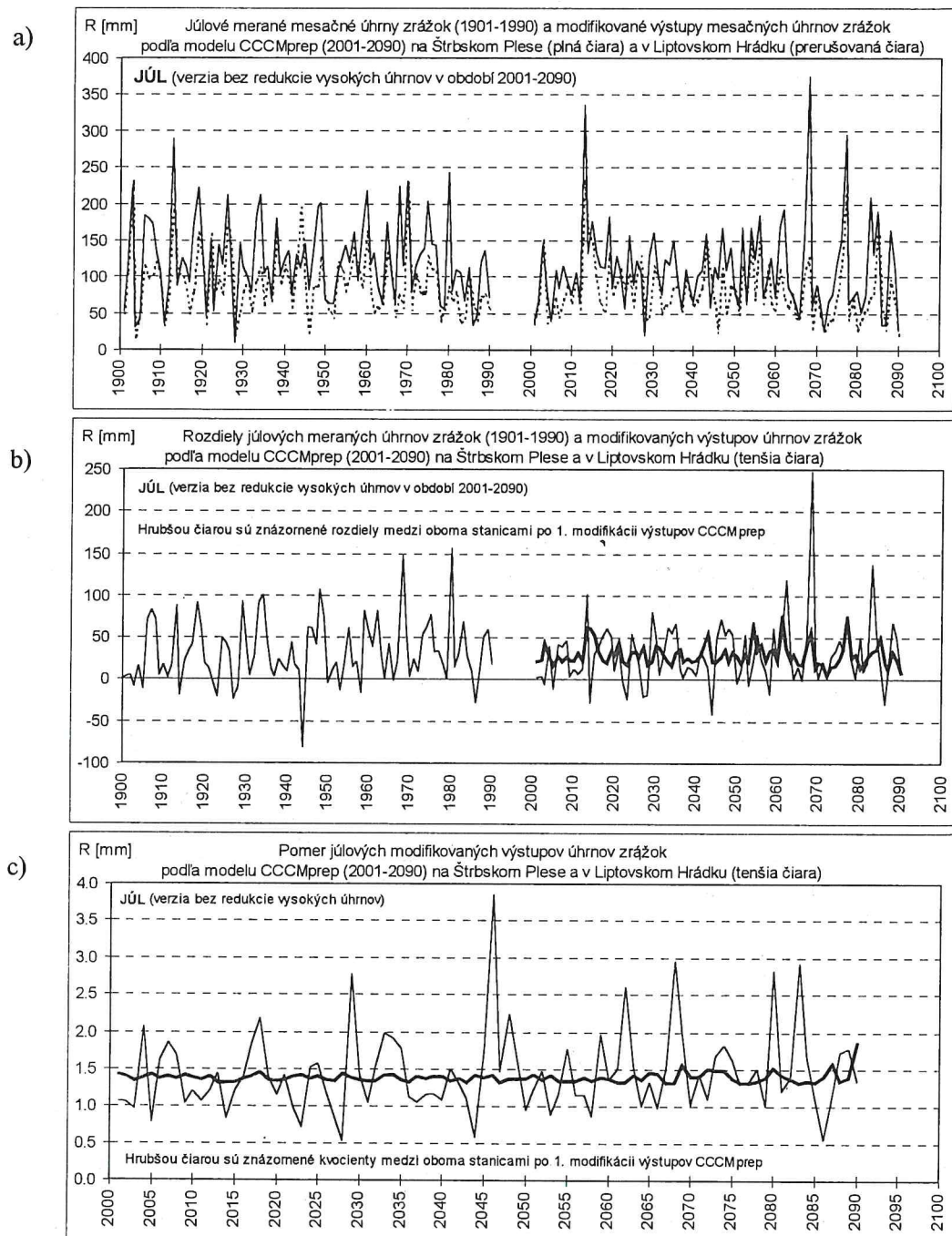
Obr. 25 Problém konštrukcie scenárov zmien mesačných priemerov teploty vzduchu (hore) a mesačných úhrnov zrážok (dole) môžeme demonštrovať na porovnaní 30-ročných (tenšie čiary) a 50-ročných (hrubšie čiary) kľzavých priemerov vypočítaných z mesačných výstupov modelu CCCMprep pre 6.uzlový bod; porovnávanie rôznych 30-ročných časových horizontov (napríklad 1951-1980 a 2016-2045) môže najmä pri úhrnoch zrážok znamenať aj >10% odchýlky scenárov pri postupnej zmene druhého obdobia.



Obr. 26 Ukážka modifikovaného výstupu mesačných priemerov teploty vzduchu pre júl z modelu CCCMprep pre stanice Hurbanovo a Liptovský Hrádok; pre obdobie 1901-1990 sú uvedené merané údaje a pre obdobie 2001-2090 modifikované údaje z výstupov CCCMprep; pri tejto verzii modifikácie sa zachováva konštantný rozdiel T pre jednotlivé mesiace, pretože sa používa pre celú SR iba jeden teplotný scenár; ku koncu obdobia rastie variabilita júlových teplôt v súlade s rastom variability výstupov CCCMprep, modifikácia variability pomocou smerodajnej odchýlky iba zmenila variabilitu časového radu v období 2001-2090 s rovnakým kvocientom ako v kontrolnom období 1901-1990.

Naznačenou metodikou sme pripravili 15 časových radov mesačných úhrnov zrážok a 6 časových radov mesačných priemerov teploty vzduchu pre obdobie 2001-2090 v troch verziách modifikácií pri R , pričom sú rozdiely medzi jednotlivými verziami najmä v priestorovej premenlivosti údajov. Vzhľadom na ne-

dostatok priestoru, nemôžeme na tomto mieste prezentovať viac výsledkov. Pre riešiteľov impaktných štúdií môžeme postupne v roku 2001 pripraviť aj časové rady ďalších prvkov, hlavne vlhkosti vzduchu a globálneho žiarenia. Najdôležitejším cieľom pre budúce obdobie pri konštrukcii scenárov je príprava časových radov extrémnych úhrnov zrážok pre jednotlivé stanice a jednotlivé oblasti Slovenska. Je zrejme, že takúto úlohu môžeme riešiť až po dôkladnej analýze časových radov meraných extrémnych hodnôt v období 1901-1990 (2000). Vzhľadom na to, že výstupy GISSprep sú v tvare časových radov 10-ročných priemerov mesačných hodnôt (iba ročné hodnoty majú podobné rady ako CCCMprep), príprava scenárov časových radov vyžaduje odlišnú metodiku, ktorou sa budeme zaoberať v roku 2001 a neskôr.



Obr. 27 Ukážka modifikovaného výstupu mesačných úhrnov zrážok pre júl z modelu CCCMprep pre stanice Štrbské Pleso a Liptovský Hrádok; pre obdobie 1901-1990 sú uvedené merané údaje a pre obdobie 2001-2090 modifikované údaje z výstupov CCCMprep; pri tejto verzii modifikácie sa zväčšuje priestorová premenlivosť údajov v súlade so stavom z kontrolného obdobia 1901-1990 (viď rozdiely úhrnov na obr.27b); na obr. 27c vidíme, že po prvej modifikácii vznikol takmer konštantný pomer úhrnov medzi stanicami, ktorý sa po druhej modifikácii výrazne zmenil napriek priestorovej blízkosti oboch staníc.

8. ZÁVERY

Správa NKP SR z problematiky regionálnej modifikácie (konštrukcie) scenárov klimatickej zmeny na základe výstupov najnovších (prepojených) modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs) poskytuje riešiteľom "impaktov" klimatickej zmeny široké možnosti využitia. Príspevok považujeme iba za prvú etapu prezentácie najnovších výsledkov modelovania klímy. Výstupy GCMs, ktoré získali riešitelia KMK FMFI UK priamo z laboratórií zaoberajúcimi sa modelovaním klímy v Kanade a USA umožňujú oveľa širšie využitie. V kap.4 sú uvedené premenné tvoriace výstupy modelov, ktoré sú všeobecne fyzikálne "previazané", čiže akákoľvek kombinácia premenných zaručuje fyzikálnu konzistentnosť výstupov. V procese regionálnej modifikácie dochádza k určitému porušeniu pôvodných fyzikálnych väzieb medzi premennými, čo sme sa snažili minimalizovať jednak použitím overených metód regionálneho "downscaling-u" a tiež dôslednou analýzou kontrolných radov podľa čo najdlhších radov pozorovanej klímy na Slovensku. Výsledkom prezentovanej regionálnej modifikácie sú 3 verzie zrážkových scenárov CCCM, pričom CCCMprep30 je založený na použití kontrolného radu 1951-80 a 30 ročných časových horizontov, CCCMprep90 na kontrolnom rade 1901-90 a 50-ročných časových horizontoch a CCCMprep je odvodený z CCCMprep90 podľa prepočtu normálov meraných úhrnov zrážok z obdobia 1901-90 na 1951-80 po jednotlivých mesiacoch. Metodiky downscalingu sa dôslednejšie pridrižiava konštrukcia zrážkového scenára CCCMprep90, tu však treba používať výlučne zrážkové normály z obdobia 1901-1990. Variabilnosť konštrukcie zrážkových scenárov vyplýva z veľkej premenlivosti zrážok.

V správe sme použili také verzie GCMs, ktoré predpokladajú zdvojnásobenie koncentrácie CO₂ okolo roku 2050, rast koncentrácie síranových aerosólov do roku 2050 a potom pomalý pokles. Takýto vývoj je o niečo nepriaznivejší ako predpokladá IS92a emisný scenár IPCC. Posledný vývoj s "neochotou" svetového spoločenstva redukovať emisie skleníkových plynov môže znamenať, že práve takýto scenár koncentrácie skleníkových plynov bude reálny v 21. storočí. Niektoré iné GCMs a GCMs+analogové scenáre dávajú vyššie hodnoty oteplenia a nižšie hodnoty úhrnov zrážok pre územie Slovenska. Máme snahu sledovať aj tieto modely a operatívne budeme o tom informovať odbornú verejnosť.

Pre rok 2001 navrhujeme pokračovať v modifikácii ďalších výstupov týchto modelov, vrátane prípravy scenárov iných premenných (extrémy, snehová pokrývka, vlhkosť pôdy, výpar, denné hodnoty, časové rady...). KMK FMFI UK má na takéto aktivity vytvorené dobré predpoklady a má snahu riešiť takéto úlohy aj formou iných grantov a projektov.

V práci sme použili klimatické údaje SHMÚ v Bratislave, za čo ďakujeme pracovníkom SHMÚ, ktorí iniciatívne pripravili kvalitné 90-ročné časové rady z 16 staníc pre tzv. "kontrolnú zrážkovú klímu". V príspevku sme použili čiastočne aj výsledky grantu VEGA č. 1/5196/98 riešeného v KMK v rokoch 1988-2000, ide predovšetkým o analýzu zmien a variability klímy na Slovensku od roku 1901 a 1951.

LITERATÚRA

- Boer, G.J., McFarlane, N.A., Lazare, M. (1992): Greenhouse Gas-induced Climate Change Simulated with the CCC Second-Generation General Circulation Model. *J. Climate*, 5, 1045-1077.
- Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge 1995, 339 pp.
- Carson, D.J. (1999): Climate modelling: Achievements and prospects. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 125, 1-27.
- Druhá Národná správa o zmene klímy (1997): Schválená vládou SR 24.6.1997. Vypracovali: 5 ministerstiev SR, SHMÚ, NKP SR, Profing, s.r.o. a VÚD, vydal SHMÚ, 1997, 74 s. (vydané aj v anglickej verzii v r. 1997).
- ECSN (1995): Climate of Europe. European Climate Support Network, 72.
- Hewitson, B., Crane, R.G. (1992): Regional Climates in the GISS Global Circulation Model: Synoptic-Scale Circulation. *J.Climate*, 5, 1002-1011.
- Hrvol', J. (1999): Model computations of changes of total radiation balance of active earth surface and its components by the time frame 2075 at chosen stations of Slovakia. *Acta Meteorologica Univ. Comenianae*, Volume XXVIII, Comenius University, Bratislava, 35-58.
- IPCC WG1 Third Assessment Report (2000), (v tlači, autori mali k dispozícii 2. draft verziu)
- Lapin, M., Damborská, I., Melo, M., (1999): Modifikované GCMs scenáre časových radov teploty vzduchu a zrážok pre Slovensko. In.: Zborník z medzinárodnej konferencie "Atmosféra 21. storočia, organizmy a ekosystémy", Zvolen 7.-9. 9. 1999, TU Zvolen, s. 207-214.
- Lapin, M., Melo, M. (1999): Climatic Changes and Climate Change Scenarios in Slovakia. *Meteorologický časopis*, 2, č.4, SHMÚ, Bratislava, 5-15.
- 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., 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, 219 pp.
- Lapin, M., Šťastný, P. (2000): Radiačné zosilnenie, klimatická zmena a iné súvislosti rastu skleníkového efektu atmosféry. Zborník z 15. medzinárodného snežného seminára 19-23.6.2000 v Patinciach. Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo (v tlači), <http://www.suh.sk/obs/slnsem/lapin/lapin.htm>
- Lapin M., Damborská I., Faško P., Melo M., Šťastný P. (2000): Scenarios of Climatic Extremes for Slovakia. In.: Proceedings of the International Conference "Millennium...", Images of Weather and Climate, Cracow, September 20-22, 2000, 159-170.
- Marečková, K., Lapin, M., Minárik, B., Mojík, I., Závadský, I., Závodský, D., Zuzula, I. (1997): Územná štúdia Slovenska, Záverečná správa, U.S. Country Studies Program, Ministerstvo životného prostredia SR, Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava 1997, 108 s. (slovenská a anglická verzia)
- 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. *J.Climate*, 5, 1013-1044.
- Melo, M. (1996): Klimatické scenáre. In: NKP SR, 4, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 5-21.
- Melo, M. (1999): Pokrok pri modelovaní klímy. Bulletin SMS pri SAV, X, č.2, 17-18.
- Melo, M., Lapin, M. (2000): Teplotné scenáre pre Slovensko založené na výstupoch kanadských klimatických modelov. *Geografický časopis*, 52, 2, 151-165.
- Meteorologický slovník výkladový terminologický (1993): Academia, MŽP ČR, Praha, 594.
- Russell, G., L. (1998): Atmosphere-Ocean Model Simulation. Future Climate Projections. NASA (Goddard Institute for Space Studies (GISS, New York, USA). Popis modelu GISS na CD-ROM.
- SWCC (1990): The Second World Climate Conference Statement. Int. Geneva, Conference Center, 1990, 10 pp.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Čunderlik, J., Parajka, J., Lapin, M. (1999): Impact of Climate Change on the Hydrological Regime of Rivers in Slovakia. Monografia Slovenského výboru pre hydrológiu. Polygrafia vedeckej literatúry a časopisov SAV v Bratislave, 101 s.
- Trenberth, K.E. (ed) (1992): Climate System Modeling. Cambridge University Press, 788.
- WMO Statement on the Status of the Global Climate in 1999 (2000). WMO, Geneva, 12 pp.

New Scenarios of Climate Change for Slovakia based on the Coupled GCM outputs

^(1,2)Lapin, M., ⁽¹⁾Melo, M., ⁽¹⁾Damborská, I., ⁽¹⁾Gera, M., ⁽²⁾Faško, P., ⁽¹⁾Dept. of Meteorology and Climatology MFF UK, Bratislava and ⁽²⁾Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava

ABSTRACT

From 1995 to 1997 the Slovak Republic's Country Study and National Climate Program teams presented the regional modification of three General Circulation Models (GCMs) output (CCCM, GISS, GFD3 runs realised in 1989 to 1994) as climate change scenarios for Slovakia. The 1951-1980 period was selected as baseline scenario at the downscaling methods. All three selected GCMs (the best from 5 analysed) had significant deviations in observed and control climate. The deviations of 30-year averages round 2010, 2030 and 2075 from the control climate period (1951-1980) average have been adopted as regional scenarios after smoothing of abrupt deviations in the annual pattern. Only one general temperature and one solar radiation scenarios were adopted for all Slovakia, but two different scenarios have been calculated for precipitation totals' change (one for 1/3 territory in northern Slovakia and the second for 2/3 of southern Slovakia). The annual increases in temperature were 3.4 to 4.3 °C and 0% to 16% in precipitation by 2075 time frame. (Lapin et al., 1995, 1997, Szolgay et al, 1999).

The CCCM and GISS coupled GCMs selected for this National Climate Program study are significant in several advantages. These GCMs represent a continuity in climate change scenarios design in Slovakia, there was a possibility to use the most recent outputs (1998 and 1999) of very developed climatic models, these models can offer a great number of parameters as outputs based on different IS92 IPCC emission scenarios (the versions with no change and differently changed CO₂ and aerosols concentration). We used the GCM versions with 1% increase of CO₂ concentration in 1980-2100 and increase in aerosols concentration up to 2050. Four GCM gridpoints are located nearly at the same sites round Slovakia and the control climate represents observed climate (1901-1990) in central Europe much better than at the former versions used in Slovakia. Many physically plausible parameters are the additional advantage.

Selected Figures and Tables description: Figures 3 and 4: Deviations of 10-year temperature means for Hurbanovo from 1871-2000 normal and 10-year areal precipitation totals in Slovakia in % of 1881-2000 normal; Tables 1 and 2: Precipitation totals in % of 1901-1990 normal, temperature T, sun shine duration SS and water vapour pressure TP deviations from 1901-1990 normal in %. Figures 8 to 11: Comparisons of GCMs temperature and precipitation outputs in 4 (6) round Slovakia coupled GISS (CCCM) gridpoints. Tables 6 and 7: Temperature, precipitation, specific humidity and solar radiation scenarios for Slovakia based on the coupled CCCM and GISS models output; Tables 9 and 11: Precipitation scenarios for several stations in Slovakia based on the coupled CCCM and GISS models output; Figures 26 and 27: Samples of monthly temperature and precipitation time series scenarios based on the coupled CCCM and GISS models output with spatial modification.

SOUHRNNÁ ZPRÁVA

Národního klimatického programu ČR

O

PŘÍPRAVNÉ FÁZI PRAVIDELNÉHO SLEDOVÁNÍ ZMĚN KLIMATU

A JEJICH DOPADŮ

*Jaroslava Kalvová⁽¹⁾, Vít Květoň⁽²⁾, Ivana Nemešová⁽³⁾, Bořivoj Sobišek⁽²⁾, a kol.
⁽¹⁾ KMOP MFF UK Praha, ⁽²⁾ ČHMÚ Praha, ⁽³⁾ ÚFA AV ČR Praha*

Zpráva obsahuje výsledky přípravné fáze projektu "Výzkum dopadů klimatické změny vyvolané zesílením skleníkového efektu na Českou republiku". Projekt je financován Ministerstvem životního prostředí ČR a výsledky jsou publikovány s jeho laskavým svolením.

ČÁST I

VÝSLEDKY DOSAVIDNÍCH STUDIÍ DOPADŮ ZMĚNY KLIMATU NA HYDROLOGICKÝ REŽIM, SEKTOR ZEMĚDĚLSTVÍ A LESNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ

1. Úvod

Trvale rostoucí koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře v posledních desetiletích v souvislosti s trvale rostoucí globální přízemní teplotou vzduchu již od poloviny minulého století signalizují možnost změny klimatu Země. Tato změna klimatických podmínek představuje v celosvětovém měřítku přídavný stres pro řadu ekologických a socioekonomických systémů, které jsou již v současnosti narušeny antropogenní činností. Rámcová úmluva OSN o změně klimatu je výrazem toho, že převážná většina civilizovaného světa si je vědoma možných rizik spojených se zmíněnou stoupající koncentrací skleníkových plynů v atmosféře, která může vyvolat nežádoucí změny v klimatickém systému Země. Přestože je nepopiratelné, že hlavním záměrem Úmluvy je snaha snížit emise radiačně aktivních plynů do atmosféry, důležitým článkem je také monitoring a výzkum, jak klimatologický, tak také výzkum dopadů možné změny klimatu a studie adaptačních opatření, která by mohla negativní vlivy změny klimatických podmínek redukovat.

Česká republika chápe přistoupení k Úmluvě jako trvalý a spojitý proces. Základním postojem je prioritní realizace takových domácích opatření, která by vedla ke snížení emisí, tj. zejména opatření vedoucích k úsporám energie, protože dominantním zdrojem emisí je právě energetický sektor. Uskutečnění adaptačních opatření, která by měla vést ke zmírnění dopadů změny klimatických poměrů, vyžaduje monitoring a regionálně zaměřený výzkum citlivosti, adaptability a zranitelnosti hlavních hospodářských sektorů. Teprve posouzení možného vlivu změny klimatu na zmíněné sektory vytváří vhodné prostředí pro návrh adaptačních opatření v měřítku celé republiky.

Kvantifikace dopadů změny klimatických podmínek na hospodářské sektory a na životní prostředí je obtížnou záležitostí z mnoha důvodů. Jedním z nich je např. neurčitost projekcí z globálních klimatických modelů, a to zejména v menších oblastech. Proto je důležitý výzkum metod, vedoucích ke zpřesnění scénářů změny klimatu. Dalším faktorem je okolnost, že systémy, ve kterých se dopady studují, jsou zároveň podrobeny řadě dalších stresů, jejichž vzájemné působení není vždy lineární či aditivní. Nadto, většina odhadů dopadů se určuje pro zdvojnásobené koncentrace skleníkových plynů v atmosféře a jen výjimečně se zohledňuje dynamická odezva systémů na spojitě se zvyšující koncentraci a vzájemné působení stresových faktorů. Současná úroveň poznání mnoha kritických procesů je často limitujícím činitelem. Dalším problémem je, že se odhady dopadů změny klimatu určují na pozadí projekce budoucího vývoje bez zahrnutí vlastního vlivu změny klimatických podmínek. Proto můžeme předpokládat, že nastanou změny, které nelze při dnešním stavu znalostí předvídat.

V České republice se začala věnovat zvýšená pozornost problematice změny klimatu a jejích dopadů teprve v posledním desetiletí. Národní klimatický program České republiky, NKP ČR, následník federálního NKP ČSFR (založeného v roce 1991), vytvořil vhodnou platformu pro soustavné studium změny klimatu a jejích dopadů na ČR, protože sdružuje odborníky z mnoha relevantních oborů. Nejdůležitější projektem NKP ČR byla

tzv. Územní studie změny klimatu České republiky (1993-1995), která byla podpořena vládou USA. Americkou stranou byly poskytnuty některé výstupy ze starších verzí klimatických modelů a vybrané impaktní modely, které bylo možno použít pro studium citlivosti a dopadů změny klimatu v zemědělství, lesním a vodním hospodářství.

Většina studií provedených nebo rozpracovaných po roce 1995 navázala na rozsáhlou Územní studii, ale neexistovala žádná centrální koordinace, takže se jednotlivé vybrané dílčí problémy řešily a řeší v grantových projektech, podporovaných grantovými agenturami, hlavně GA ČR, GA AV ČR, MŽP a MZe. V závislosti na typu grantové agentury se liší charakter výsledků projektů: některé jsou zaměřeny spíše na základní výzkum (problematika IGBP - International Geosphere-Biosphere Programme, World Climate Research Programme), jiné zohledňují více možnost aplikací v praxi.

2. Výzkumné aktivity v sektoru zemědělství

Období po Územní studii lze charakterizovat hlavně tím, že citlivost vybraných plodin (kukuřice a pšenice ozimá) a dopady na jejich výnosy byly studovány pomocí růstových simulačních modelů. Tyto modely jsou schopné simulovat jak růst a vývoj rostliny, tak její reakci na změnu abiotických podmínek a jsou v současné vědě používány ke stanovení odhadu dopadů změny klimatu. Pro studium odhadu dopadů (hlavně v projektech GA ČR) byly použity modely řady CERES (CERES-Maize a CERES-Wheat), které lze považovat za moderní alternativu ke studiím agroklimatického potenciálu. Tyto studie neumožňují zohlednit přímý vliv zvýšené koncentrace CO_2 v atmosféře. Celorepublikové mapy hodnot agroklimatického potenciálu pro vybrané scénáře změny klimatu v ČR byly jedním z hlavních výsledků Územní studie v sektoru zemědělství.

Růstové simulační modely byly verifikovány a aplikovány na zmíněné zemědělské plodiny v regionu jižní Moravy, která patří do agroklimatické makrooblasti teplé, oblasti dostatečně teplé, podoblasti velmi suché a okrsku převážně mírné zimy. Validace a "parametrizace" modelů před jejich použitím k citlivostní analýze a odhadům dopadů na výnosy plodin je nezbytným krokem. Modely umožňují posouzení přímého, nepřímého i kombinovaného vlivu změny koncentrace CO_2 na reálný a potenciální výnos kulturních plodin.

Výsledek validace růstového modelu pro ozimou pšenici nebyl tak dobrý jako pro kukuřici. Ve většině let byly modelové výnosy ozimé pšenice nižší než pozorované. V těchto letech lze najít sušší periody i podnormální srážkové úhrny. Validace byla úspěšná v těch letech, ve kterých bylo množství srážek a jejich distribuce optimální. Scénáře změny klimatu byly odvozeny z denních výstupů německého klimatického modelu ECHAM3/T42. Pro generování denních časových řad meteorologických proměnných pro časové horizonty $1,5\text{xCO}_2$ a 2xCO_2 byl použit hlavně stochastický generátor, který generuje dlouhé řady denních údajů a tím umožňuje lepší statistické zpracování výsledků.

Použité růstové simulační modely přinesly tyto výsledky:

- Vliv samotné změny klimatu (uvažuje se jako nepřímý vliv nárůstu koncentrace CO_2): klima se mění podle scénáře, ale koncentrace CO_2 odpovídá dnešní. Výsledkem je, že reálný (stresovaný) výnos *se snižuje u kukuřice o 27% ve srovnání se současným stavem a u pšenice mírně vzrůstá (o 3%)*.
- Přímý vliv koncentrace CO_2 : klima je současné (tzv. 1xCO_2 klima), jen atmosférická koncentrace CO_2 se zdvojnásobí. Podle simulací by došlo ke *zvýšení výnosu kukuřice o 24% a pšenice dokonce o 33%*. Pozitivní vliv zvýšené koncentrace je vyvolán zvýšením asimilační aktivity a vyšším uzavřením stomat.
- Kombinace přímého a nepřímého vlivu. Realizované simulace jednoznačně ukazují, že u kukuřice převažuje kladný přímý vliv zvýšené koncentrace CO_2 nad záporným nepřímým vlivem změny klimatických podmínek. Z pohledu výnosů jde o *růst výnosů o 16% u kukuřice a o 31% u pšenice pro 2xCO_2 klima*. Variabilita výnosu pšenice se nemění, kukuřice se vyznačuje větší výnosovou jistotou. Kladný přímý vliv koncentrace evidentně převažuje nad záporným vlivem změny klimatických podmínek.

V 2xCO_2 klimatu lze očekávat vyšší produkci biomasy, odpovídající zvýšení indexu plochy listů, a vyšší výnos. Zkrátí se doba vegetace. Reálný výnos poroste rychleji než potenciální a proto roste index produkčního potenciálu.

Je žádoucí poznamenat, že dosavadní výsledky nerespektují několik negativních doprovodných důsledků. Jedná se zejména o *vliv chorob a škůdců*, kteří se s nárůstem efektivní sumy teplot mohou stát v mnoha oblastech limitujícím produkčním prvkem, což by mohlo být provázáno možným výskytem zcela nových chorob a škůdců, proti kterým není zpracován systém prognózy a signalizace. Také není známo, jak se rostlina může vyrovnat s postupně se zvyšující koncentrací CO_2 . Existují ještě další faktory, které mohou mít rozhodující vliv, jako např. postupná aridizace zemědělských oblastí.

Adaptační opatření mají být zaměřena na

- zvýšení rozmanitosti agrotechnických systémů
- adaptaci zemědělské techniky
- rozvoj agrometeorologických služeb
- ekonomickou situaci v zemědělství
- řešení okruhů syntetického charakteru, propojujících procesy v krajině.

3. Výzkumná činnost v sektoru lesy

Územní studie změny klimatu ČR vytvořila vhodné podmínky pro další aktivity, podobně jako tomu bylo i v jiných sektorech. Je nesporné, že změna klimatických podmínek bude mít velký vliv na procesy fyziologie stromů a lesní ekosystémy. Očekává se, že současný špatný stav lesních porostů, vyvolaný zejména zátěží ze znečištění ovzduší, by se podstatně zhoršil. Jde hlavně o riziko možného rozpadu nestabilních dospívajících a dospělých stanovištně nevhodných smrkových monokultur a zvýšení abiotických škod při extrémních povětrnostních situacích, provázených rozvojem patogenů.

Hlavním výstupem Územní studie byl odhad dopadů změny klimatu na lesy založený na nedynamickém korelativním modelu, který svazuje současné klimatické podmínky a lesní vegetační stupně. Vegetační stupňovitost byla určena podle registru biogeografie ISÚ, který obsahuje informace o zastoupení nadstavbových jednotek geobiocenologické typizace krajiny v rámci katastrálních území ČR. Prostorové změny lesní stupňovitosti byly odhadnuty jako trendy jejích změn pro změněné klimatické podmínky. Model je založen na metodě prostorových analogií a nezohledňuje zvyšující se koncentraci CO₂. Není schopen postihnout ani změny v režimu klimatu (průběh počasí).

V období po Územní studii probíhalo mnoho projektů, které tak či onak souvisejí se studiem možných dopadů změny klimatu na lesy a lesní ekosystémy, ale byly zaměřeny na problematiku dílčí, jako např. na citlivost půd na změnu klimatu, mikroklima lesních společenstev a výživu porostů. V několika projektech byla studována reakce druhů dílčích populací lesních dřevin na změny podmínek prostředí, jmenovitě na vyšší teploty vzduchu. Ekofyziologický výzkum se v současné době zaměřuje na schopnost lesních ekosystémů přizpůsobit se změně klimatu ve smyslu udržení růstu a vývoje lesních dřevin, na hlediska dostupnosti živin, na vodní režim a fyziologické odezvy na biotické a abiotické faktory. Oteplení klimatu u nás naznačuje, že by mohlo dojít k nebezpečnému stresu suchem. Další stanovištní faktory, jako světlo, teplota vzduchu, dostupnost živin, případně znečištění prostředí by mohlo působit synergicky s půdní vlhkostí a ovlivňovat toleranci vůči suchu. Velmi náročným problémem se jeví určení přímého vlivu zvýšené koncentrace CO₂ v atmosféře. Na jedné straně lze očekávat, že se zvýšená koncentrace projeví ve zvýšení růstu rostlin a produkci biomasy. Dlouhodobý účinek však naznačuje, že může dojít k výskytu *aklimační deprese fotosyntetické aktivity*. Výsledný efekt se tak může pohybovat v rozmezí od žádného efektu na přírůst, přes zvýšený nárůst kořenů a letorostů až po změnu nárůstu letorostů a kořenů ve prospěch jednoho či druhého, a to v souladu s principem rovnováhy mezi potenciálem dřeviny asimilovat a potenciálem kořenového systému dodávat živiny. Asimilační aktivita porostů během vegetační sezóny byla studována experimentálně i pomocí simulačních modelů MAESTRO a MAESTRA v lokalitě Bílý kříž v Beskydách.

Odlíšným problémem se jeví odhad dopadů v celorepublikovém měřítku. Statický model posunu vegetačních stupňů by mohl být zlepšen použitím rozšířeného souboru klimatologických charakteristik s využitím některých dalších vztahových klimatických indexů. Tak by mohlo dojít k lepšímu pochopení režimu mezoklimatických dějů v podmínkách ekosystémů lesa v jeho vývojových fázích. Pro zpřesnění odhadu dopadů by bylo rovněž žádoucí, aby byly vytvořeny databáze ročních přírůstů z vývrtů dřevin, celkových přírůstů porostu a aby bylo realizováno měření složek vodní bilance lesních porostů a to i v době mimovegetační.

Adaptační opatření mají být zaměřena tak, aby omezené finanční prostředky byly vynaloženy prioritně na taková opatření, která je třeba realizovat pro zvýšení stability a funkčnosti lesů při dodržování principu trvale udržitelného hospodaření s lesními zdroji. Podle schválené lesní politiky je třeba podporovat

- uchování genových zdrojů pro zabezpečení biologické rozmanitosti lesních ekosystémů
- postupnou změnu druhové skladby větším zastoupením listnatých dřevin
- využití přírodních blízkých pěstebních postupů
- realizaci řádné výchovy mladých porostů
- důsledné uplatňování principů integrované ochrany lesů

Z hlediska ochranných funkcí lesa je potřebné řešit stav lesních komunikací a uplatnit šetrné technologie těžby a transportu dřeva. Státní správa lesů by měla zlepšit poradenství vlastníkům lesa.

4. Výzkumné aktivity v sektoru hydrologie

Při změně klimatu vyvolané zesílením skleníkového efektu dojde k ovlivnění hydrologického cyklu. V souvislosti s očekávanou změnou klimatických podmínek nelze vyloučit, že na části území České republiky se *zmenší vydatnost vodních zdrojů*, což by současnou, nepříliš příznivou hydrologickou situací mohlo ještě zhoršit.

Pro odhady dopadů změny klimatu na hydrologický režim jsou nejdůležitější klimatologickou proměnnou srážkové úhrny. Ty však jsou v projekcích změny klimatu mnohem problematictější veličinou než teplota vzduchu. Proto se prováděné hydrologické studie zaměřují hlavně na citlivostní analýzu.

V Územní studii změny klimatu ČR byly pro stanovení citlivosti a odhady dopadů v částech povodí Labe, Želivky a Úpy používány modely BILAN (ČR), CLIRUN (Polsko) a SAC-SMA (USA). Důraz byl kladen na přírůstkový scénář. Většina výsledků naznačila shodně *pokles odtoků a zmenšení podzemního odtoku*. Také *stav vodních nádrží by se zhoršil*. Očekává se rovněž *zvýšení tepelného znečištění toků*.

V období po roce 1995 navázala řada projektů na rozvinutou spolupráci v Územní studii změny klimatu ČR. Pro citlivostní analýzu desítek povodí byly využity scénáře změny klimatu z několika globálních cirkulačních modelů, které byly poskytnuty v rámci evropské spolupráce (projekt podporovaný EU). Přestože různé simulace dávají odlišné výsledky, zjištěné trendy jsou shodné. Základní poznatky získané citlivostní analýzou lze shrnout takto:

Změna odtoku je velmi citlivá na změnu množství srážek a jejich roční chod. Relativně malé změny dlouhodobých průměrů atmosférických srážek zesílí (nebo potlačí) účinky poměrně velkých změn v dlouhodobých průměrech teploty vzduchu. Orientačně lze uvést, že *zmenšení průměrného odtoku, vyvolané zvýšením průměrné roční teploty vzduchu o 2 °C může být kompenzováno zvýšením srážek o 5%, nebo zdvojnásobeno snížením srážkových množství o 5%*. Nezmění-li se dlouhodobý průměr srážkových úhrnů, pak *zvýšení teploty vzduchu o 2 °C by způsobilo ve většině povodí pokles průměrného průtoku o 10 až 15%*. Snížená akumulace vody ve formě sněhových zásob způsobí změny v ročním chodu odtoku. V zimě se odtok zvýší, na jaře zmenší, v pozdním létě a na podzim se průtoky zmenšují. Při očekávaném zvýšení odtoků v chladné části roku je možné, že vzroste četnost povodní. V regionálním měřítku jsou na změnu klimatických podmínek relativně nejméně citlivé průtoky v horských povodích severních Čech. Poklesem průtoků se vyznačují zejména ta povodí, kde jsou menší srážky a ve kterých neexistují větší akumulací prostory. Pro zachování stávající úrovně odběrů vody jsou důležité velikosti zásobních prostorů nádrží. Obecně jsou větší nádrže méně citlivé než menší, ale každou nádrž je třeba studovat samostatně. Simulace ukazují, že v létě a na podzim lze očekávat zřetelné prohloubení deficitu půdní vláhy a zásob podzemní vody. Velmi problematickou se jeví kvantifikace evapotranspirace, která je klíčovou charakteristikou. Evapotranspirace nezávisí jen na meteorologických a hydrologických podmínkách, ale také na charakteru krajiny a jejím využití. Aktuální evapotranspiraci, sestávající z několika složek (transpirace, intercepce dešťových srážek, intercepce a výpar ze sněhu, výpar z holých ploch), je třeba věnovat v dalším výzkumu velkou pozornost.

Adaptační opatření byla navržena ve VÚV TGM a jsou výsledkem analýz a konfrontace změn vodního hospodářství a kapacit vodních zdrojů se současnou koncepcí rozvojové politiky, se státní strukturou vodního hospodářství a se stavem životního prostředí ČR. Vstupním údajem pro každý region v působnosti podniků Povodí a.s. bude inventarizace potřeb, která bude zahrnovat zejména:

- posouzení technického stavu jednotlivých vodohospodářských děl a možnosti jejich další intenzifikace,
- revize manipulačních řádů vodohospodářských soustav v důsledku změn nároků na užívání vody po roce 1990,
- odhad volných kapacit zdrojů v budoucnosti a návrh způsobu jejich využití na základě přehodnocování návrhových parametrů vodních děl,
- zajištění současného stavu vytížení zdrojů jako výchozí stav před změnou klimatu,
- stanovení výhledových potřeb jednotlivých druhů užívání vody v regionu a jejich případných priorit.

Opatření je možné rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny patří taková opatření, která jsou v současné době definována jako součást politiky životního prostředí ČR. Ta sledují zabezpečení trvale udržitelného rozvoje a jsou nezbytná bez ohledu na očekávanou změnu klimatu. Druhá skupina obsahuje adaptační opatření, která doplňují skupinu první v tom smyslu, že představují modifikace, zohledňující změnu klimatických poměrů v ČR.

5. Závěr

Stručné shrnutí hlavních výsledků výzkumných aktivit naznačuje, jak široký záběr vyžaduje řešení problematiky citlivostní analýzy a odhadu dopadů změny klimatu na jednotlivé vzájemně propojené sektory. Ukázalo se, že je nezbytné zpřesnění scénářů změny klimatických podmínek v lokálním a "regionálním" měřítku; pro odhady dopadů jsou vyžadovány zejména charakteristiky proměnlivosti klimatu a hodnoty dalších proměnných, jako jsou např. vlhkost vzduchu, směr a síla větru atd. *Současné simulační modely* v impaktivních studiích se již nespokojí se vstupy průměrných ročních a měsíčních hodnot, ale většinou vyžadují *hodnoty vstupních parametrů v denním kroku (denní časové řady)*. Pro *validaci simulačních modelů* jsou tedy zapotřebí rovněž *co nejdříve pozorované denní řady v co nejhustší síti stanic*. Jen tak je možné ověřit schopnost impaktivních modelů simulovat realitu, což je nutným předpokladem pro jejich použití při odhadu dopadů změny klimatických podmínek.

ČÁST II

VÝSLEDKY ANALÝZY AKTUÁLNOSTI DOSUD POUŽITÝCH SCÉNÁŘŮ ZMĚNY KLIMATU NA ÚZEMÍ ČR

1. Úvod

Zesilování skleníkového efektu atmosféry vyvolané růstem koncentrací skleníkových plynů v atmosféře, může ovlivnit rozsáhlý řetězec procesů probíhajících v klimatickém systému. Důsledkem může být nejen často zmiňované globální oteplování (růst globálního průměru teploty vzduchu při zemském povrchu), ale i řada dalších významných změn počínaje změnami klimatu v širším slova smyslu (změny teploty troposféry, stratosféry, změny oblačnosti, atmosférických srážek, výskytu sucha, změny monzunálních srážek, atd.). Tyto změny jsou pak vzájemně provázány se změnami biosféry, stavu oceánů, charakteru pevného zemského povrchu apod.

Přijetí Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu a následné přijetí Kjótského protokolu dokazuje, že narušení klimatického systému v důsledku lidských činností se považuje za velmi vážné ohrožení globálního životního prostředí. Speciální pozornost je zaměřena právě na změny klimatu, které mohou být vyvolány *růstem koncentrací skleníkových plynů a aerosolů* v atmosféře. V dalším textu se termín klimatická změna bude používat právě v tomto poněkud zúženém slova smyslu. Řada států reagovala na Rámcovou úmluvu OSN o změně klimatu vypracováním inventur zdrojů a propadů skleníkových plynů a odhadů zranitelnosti různých sektorů (zemědělství, lesního hospodářství, dopravy, turismu, zdraví obyvatel, atd.) potenciální změnou klimatu (tzv. územní studie). Jak již bylo uvedeno, Územní studie pro Českou republiku byla vypracována s podporou vlády USA v letech 1993-1995. V této studii byla věnována pozornost dopadům možné klimatické změny zejména na zemědělství, lesy a vodní zdroje.

Nezbytným podkladem pro vyhodnocování dopadů klimatické změny na různé sektory hospodářské činnosti člověka a životní podmínky na Zemi je vytvoření odhadu klimatických změn, které v důsledku zesilování skleníkového efektu mohou postihnout příslušný sektor, tj. vytvoření tzv. *scénáře klimatické změny*. Pod tímto pojmem rozumíme souhrn klimatologických informací definujících *jeden možný vývoj, popř. stav klimatického systému*, ucelený a vnitřně konsistentní, prostorově kompatibilní, vhodný jako vstup do impaktivních modelů. Od scénáře klimatické změny očekáváme odpověď na otázku, co se s klimatickým systémem může stát, naruší-li se jeho radiační rovnováha růstem koncentrací skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře, a tím dojde k ovlivnění složitého řetězce kladných i záporných zpětných vazeb probíhajících v klimatickém systému. Nejedná se tudíž o *předpověď* časového vývoje klimatu v příštích desetiletích, která by vzala v úvahu *všechny* možné změny klimatotvorných faktorů, kromě koncentrace antropogenních i přirozených aerosolů a koncentrace skleníkových plynů v atmosféře také např. změny sluneční činnosti, změny albeda zemského povrchu apod. Předmětem největšího praktického zájmu, zejména se zřetelem na vyhodnocování dopadů klimatické změny jsou *regionální klimatické scénáře*, které se vztahují na území menších rozměrů než má kontinent.

2. Zhodnocení dosud použitých metod vytváření scénářů změny klimatu v regionálním měřítku

V současnosti existuje několik metod používaných k vytváření regionálních scénářů klimatických změn. Jsou to zejména: metoda přímých výstupů GCM, "downscaling", empirické postupy a vytváření přírůstkových scénářů (obr. 1).

Základním zdrojem informací pro všechny scénáře jsou údaje z GCM (Global Climate Models nebo též General Circulation Models). Jako doplňkový zdroj informací se používají poznatky odvozené při analýze skutečných klimatických podmínek (metoda empirická).

Přes velký pokrok ve vývoji GCM jejich výstupy stále neposkytují dostatečné horizontální a časové rozlišení požadované při studiích dopadů změn klimatu.

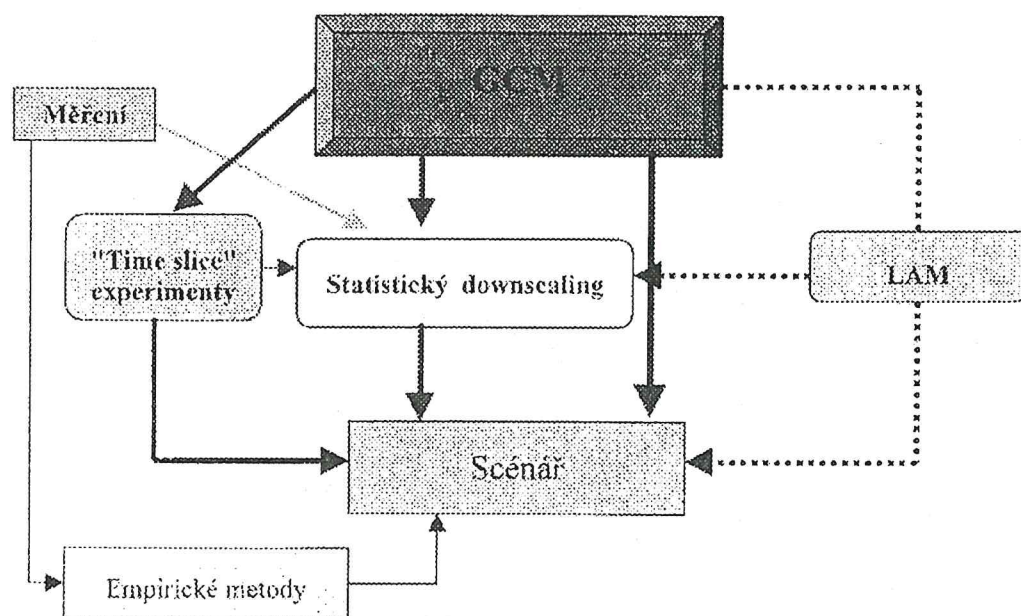
Je několik metod, jak transformovat "velkorozměrnou" informaci do podrobnějších měřítek. Souhrnně se tyto postupy nazývají "downscaling" (metoda zmenšování měřítka - český ekvivalent tohoto pojmu dosud nebyl zaveden). Downscaling zahrnuje především tzv. "time-slice" experimenty (metody "časových řezů") a statistický downscaling, který zahrnuje i stochastické generátory.

Při "time-slice" experimentech se vyšší rozlišení dosáhne bez podstatného zvýšení nároků na výpočetní techniku. Nejprve se integruje model s nižším rozlišením. Pak se zopakuje integrace v kratším období s využitím modelu s vyšším rozlišením. Pro tuto integraci se převezmou počáteční hodnoty z původního modelu s nižším rozlišením.

Statistický downscaling spočívá v hledání statistických vztahů mezi veličinami, které GCM simulují spolehlivěji (prediktory) a veličinami požadovanými pro studie dopadů (prediktandy). Nejdříve se vyhledají statistické vztahy mezi prediktory a prediktandy v pozorovaných datech, pak se tyto vztahy validují, tzn. že se uplatní na prediktory v kontrolním běhu GCM a porovnají se s pozorovanými daty. Nakonec se uvedené vztahy uplatní na prediktory v běhu GCM pro skleníkový efekt.

Statistické generátory jsou založeny na modelu reprezentujícím statistickou strukturu chování jednoho nebo několika meteorologických prvků v čase a prostoru. Rovnice modelu zahrnují náhodný člen a jejich parametry bývají odhadnuty z pozorovaných dat. S použitím generátorů lze vytvořit libovolně dlouhou syntetickou řadu, jejíž struktura se podobá struktuře pozorované řady. Generátory se používají ke generování řad reprezentujících změněné klima.

Kromě uvedených postupů se vytvářejí přírůstkové scénáře, ve kterých se předepsané změny teploty kombinují se zadanými změnami atmosférických srážek.



Obr. 1. Schema kombinace metod používaných k vytváření regionálních scénářů klimatických změn.

Jednotlivé metody lze podle současného stavu jejich poznání hodnotit takto:

Metoda přímých výstupů GCM

Výhodou GCM při konstrukci regionálních scénářů změny klimatu je skutečnost, že v sobě zahrnují řešení základních rovnic dynamiky atmosféry a oceánu a že jsou v nich zahrnuty i základní chemické procesy probíhající v klimatickém systému. Při výpočtech odezvy klimatického systému na vnesenou poruchu počítají s celou řadou zpětných vazeb. Výstupy jsou fyzikálně konsistentní.

Nedostatkem GCM je jejich malé horizontální a časové rozlišení a malé spektrum klimatických charakteristik poskytovaných pro odhady dopadů.

Metoda "přímé modifikace" pozorovaných řad je jednoduchá a zároveň často využívaná metoda aplikace výstupů GCM. Její slabé stránky spočívají v tom, že:

- nemůže být aplikována pro místa bez historických pozorování
- délka řady charakterizující změněné klima je omezena délkou pozorované řady, (tato délka nemusí být dostatečně dlouhá k získání statisticky průkazných výsledků)
- nelze provést tak detailní citlivostní analýzu jako je tomu při použití stochastického generátoru.

Při přípravě dalších scénářů změny klimatu je nutno zaměřit se na modely soustředěné v DDC (Data Distribution Centre) Mezivládního panelu klimatické změny, kde je v současné době k dispozici sedm GCM integrovaných vesměs pro období delší než sto let. Přehled jejich základních parametrů uvádí tab. 1.

Aby bylo možno využít informací DDC je nutno z metodického hlediska:

- Připravit metodiku konstrukce scénářů dalších prvků, které jsou vyžadovány pro studie dopadů změny klimatu a jsou součástí databáze DDC (vítr, parametry vlhkosti). S těmito modelovými veličinami se zatím v ČR nepracovalo.
- Pokusit se u vybraných modelů získat denní data, navrhnout a prověřit metodiku analýzy změn proměnlivosti teplotních a dalších charakteristik a zohlednit tyto změny ve scénářích.

Kromě DDC databáze je nutno sledovat vývoj globálních i regionálních modelů i v hlavních světových centrech modelování klimatu. Úsilí v ČR by ale mělo být zaměřeno rovněž na vytvoření vlastního regionálního klimatického modelu, který by byl určen pro střední Evropu. Je totiž reálné rozšířit stávající projekt "LACE" (Limited Area Modelling in Central Europe), v rámci kterého se na počítači NEC v ČHMÚ operativně počítá regionální numerický předpovědní model počasí pro střední Evropu, i na klimatické modelování. V současné době již ČHMÚ jedná s pracovníky Météo-France o poskytnutí globálního modelu ARPEGE-climat. Po optimalizaci ARPEGE-climat na počítači NEC v Praze by vznikla jednak možnost provádět experimenty s globálním klimatickým modelem, jednak postupně vytvořit klimatickou verzi modelu ALADIN, tedy vlastní regionální klimatický model. Studie odhadů dopadů změny klimatu by se pak opíraly o model, který je přizpůsoben našemu území. "ALADIN-climat" by zároveň představoval dobrou možnost výchovy studentů meteorologie a klimatologie i rozšíření vědecké práce doktorandů. V mezinárodním měřítku by nesporně došlo ke zvýšení prestiže české meteorologie.

Metoda statistického downscalingu

Výhody statistického downscalingu lze spatřovat v tom, že:

- Umožňuje získat hodnoty požadovaných veličin přímo v dané lokalitě (za předpokladu, že jsou v této lokalitě k dispozici potřebná klimatická data) a nemusí se vycházet z interpolace hodnot v uzlových bodech GCM.
- Využívá veličin, které jsou GCM schopny dostatečně spolehlivě simulovat.
- Umožňuje eliminovat systematickou chybu modelu.

Nevýhodou tohoto postupu je neověřitelnost jeho nutného předpokladu, že vztahy mezi velkorozměrnými poli a lokálními klimatickými proměnnými, nalezené pro současné klima, budou platit i v podmínkách budoucího klimatu.

Při dalším rozvoji metod downscalingu je třeba se soustředit na:

- Použití nelineárních metod downscalingu, které umožňují přesněji postihnout závislost mezi prediktory a prediktandy - zde přicházejí v úvahu zejména umělé neuronové sítě.
- Prozkoumání dalších možností, jak v řadách získaných downscalingem reprodukovat pozorovaný rozptyl.

Stochastické generátory

Stochastické generátory jsou často využívanou metodou konstrukce meteorologických řad s časoprostorovým rozlišením požadovaným v impaktových studiích. Parametry generátoru je možno jednoduše modifikovat podle scénáře změny klimatu a generátor lze tak použít ke generování řad reprezentujících změněné klima. Je možno generovat data i pro lokality bez denních pozorování, pro něž jsou však k dispozici měsíční charakteristiky odvozené z pozorování (interpolované z okolních stanic) nebo z GCM simulací. Nevýhodou může být, že ne všechny charakteristiky statistické struktury řad jsou generátorem dostatečně dobře reprodukovány.

Na základě výsledků dosavadních studií a prací publikovaných v odborných časopisech lze stanovit následující prioritní cíle:

- zahrnutí dalších proměnných do generátoru (charakteristiky vlhkosti vzduchu)
- analýza vztahů mezi parametry generátoru s cílem generovat data i pro lokality bez denních pozorování, pro něž jsou však k dispozici měsíční charakteristiky odvozené z pozorování (interpolované z okolních stanic) nebo z GCM simulací
- prověření možnosti aproximace rozdělení srážkových úhrnů jiným typem statistického rozdělení než je rozdělení gama
- posouzení možnosti využití Markovova modelu vyššího řádu než prvního.

Empirické metody

Empirické metody jsou v současné době používány jako postupy doplňkové k metodě GCM.

Metoda historických korelací a analogů ztrácí s rychlým rozvojem GCM svůj význam. Důležitou roli však hrají empirické postupy stále při odvozování změn sekundárních klimatických charakteristik (charakteristik buď modelem neposkytovaných nebo zatížených značnou neurčitostí). Postup založený na hledání vztahů mezi primárními (např. průměrné měsíční teploty vzduchu a úhrny atmosférických srážek) a sekundárními charakteristikami (např. sumou teplot překračujících určitou mez) v řadách přístrojových pozorování a promítnutí změn primárních charakteristik, odvozených z výstupů GCM, do změny charakteristiky sekundární, dává, kromě charakteristik s malou četností výskytu v roce, rozumnou informaci o možných hodnotách změn. V současné době, kdy začínají být k dispozici i denní výstupy GCM, může výše zmíněný postup sloužit k porovnání výsledků odvozených z přímých denních výstupů GCM pro $1\times\text{CO}_2$ a $2\times\text{CO}_2$ klima a zejména k odvozování dalších klimatických charakteristik, které nejsou z modelů stále k dispozici (např. výpar). Přínosem empirických postupů je i poznání chování klimatických prvků a charakteristik na daném území.

Použití těchto postupů pro konstrukci scénáře komplikuje:

- Předpoklad, že vazby odvozené z referenčního období se při globálním oteplování nezmění. Radiační porucha způsobená růstem koncentrací skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře může ale narušit celý systém zpětných vazeb v klimatickém systému. Navíc, v pozorovaných řadách jsou zahrnuty i vlivy dalších klimatotvorných faktorů (sopečné činnosti, sluneční aktivity apod.), včetně vnitřní variability způsobené např. interakcí atmosféry a oceánu.
- Slabé vazby mezi primárními a sekundárními charakteristikami.
- Poplatnost výsledků volbě porovnávaných období.
- Nedostatek dlouhých homogenních časových řad meteorologických pozorování.

Přes rychlý vývoj klimatických modelů budou v nejbližších letech zřejmě využívány i nepřímé metody výpočtu sekundárních klimatických charakteristik, založené na kombinaci GCM metody a metody empirické. U empirických postupů je nutno zaměřit se na:

- Možnost výpočtu výparu, a to jak na základě měřených, tak i modelových dat.
- Prověření stávající metodiky výpočtu globálního záření pomocí hodnot slunečního svitu a aktualizování těchto postupů.

Přírůstkové scénáře

Přírůstkové scénáře mají stále význam při studiu citlivosti jednotlivých sektorů hospodářství na změnu klimatu. Přírůstkový scénář, navržený v rámci Územní studie, představuje obohacení dosavadních postupů uvedených v zahraniční odborné literatuře o změny tvaru ročního chodu teploty a srážek. Užitečnost tohoto postupu se prokázala při studiích dopadů změny klimatu na zemědělství a hydrologické poměry ČR. Dopady změny

klimatu v těchto sektorech závisí mnohem více na možné změně ročního chodu teploty a atmosférických srážek než na samotné změně ročních průměrů těchto veličin.

Přírůstkové scénáře by mohly být rozšířeny o změny parametru vlhkosti vzduchu, změny globálního záření na zemském povrchu, popř. výpar a vítr. U atmosférických srážek pak o změnu počtu dnů se srážkami a změnu intenzity srážek.

3. Zhodnocení dosud vytvořených scénářů změny klimatu

Scénáře vytvořené v ČR pro odhady dopadů změny klimatu v letech 1992 -1998 byly založeny na různých kvalitních globálních klimatických modelech. Zpočátku to byly modely se směšovací vrstvou v oceánu, později i modely AOGCM (atmosféra-oceán). Použité GCM měly různou citlivost (reakci globálního ročního průměru teploty vzduchu na zdvojnásobení obsahu CO_2 v atmosféře) i různé horizontální rozlišení. Experimenty s růstem koncentrací skleníkových plynů v atmosféře se nejprve týkaly pouze rovnovážných studií, u modelů GFDLR15 a ECHAM3/T42 byla koncentrace CO_2 zvyšována postupně podle zvoleného scénáře růstu emisí skleníkových plynů v atmosféře. Tzv. "time slice" experiment zahrnoval u modelu ECHAM3/T42 již i vliv antropogenních aerosolů síry. Přiřazení hodnot pro $2\times\text{CO}_2$ klima určitému časovému horizontu se měnilo (2030, 2075, 2100) spolu s vývojem názorů na pravděpodobný růst emisí skleníkových plynů v budoucích letech.

Ke konstrukci scénářů byly použity různé metody, od metody přímých výstupů GCM, metod statistického downscalingu, po empirické metody a přírůstkové scénáře. K vytvoření časových řad s denním krokem byl použit stochastický generátor. U metody přímých výstupů GCM se osvědčila metoda aditivní a multiplikativní modifikace. Při nezbytném hlazení hodnot ročních chodů svou užitečnost prokázala metoda robustní lokální vážené regrese, která snižuje vliv odlehklých hodnot na průběh hlazené křivky.

V ČR bylo prověřeno několik lineárních metod statistického downscalingu. Z nich se jako nejlepší ukazuje metoda násobné lineární regrese z hodnot v uzlových bodech GCM. Pro downscaling měsíčních a denních hodnot teploty se jako nejlepší prediktor ukazuje kombinace proměnné popisující cirkulaci (geopotenciální výšky hladin ve střední troposféře nebo přízemní tlak) s proměnnou popisující pole teploty ve spodní troposféře (teplota hladin 850 hPa nebo relativní topografie vrstvy 1000/500 hPa).

Pro konstrukce meteorologických řad s časoprostorovým rozlišením požadovaným v impaktových studiích byl v ČR vytvořen stochastický generátor Met&Roll. Tento generátor byl použit pro přípravu časových řad teploty vzduchu, atmosférických srážek a globálního záření pro studie dopadů změny klimatu na zemědělství a hydrologii v rámci Územní studie a grantů GA ČR a AV ČR. Generátor má strukturu srovnatelnou se zahraničními produkty, výhodou je větší rozsah souboru parametrů modelu odvozených z pozorovaných řad na našem území.

V letech 1992 -1998 byly v ČR vytvořeny čtyři základní scénáře změny klimatu a jeden scénář metodického charakteru. První tři scénáře (označení I až III) byly vytvořeny v rámci projektů koordinovaných Národním klimatickým programem ČR. Scénář I byl finančně podpořen FVŽP, scénář II Ministerstvem zemědělství. Scénář III, který byl součástí Územní studie změny klimatu České republiky, finančně i technicky podpořila vláda Spojených států amerických. Scénáře I až III byly určeny pro studie odhadů dopadů změny klimatu v celé ČR.

Scénáře IV a V byly vytvořeny za podpory grantových agentur, scénář IV byl určen pro studie dopadů změny klimatu na zemědělství (oblast jižní Moravy) a hydrologický režim vybraných povodí, scénář V byl metodickou studií (zkoumány byly metody statistického downscalingu), jejíž výstupy nebyly zatím určeny ke studiím dopadů změny klimatu.

Pokud se týká klimatických prvků zahrnutých do scénářů, scénáře I a II se týkaly pouze teploty vzduchu. Scénáře III a IV obsahovaly kromě teplotních změn i změny atmosférických srážek a globálního záření. Scénář V, založený na metodě statistického downscalingu, se týkal opět pouze teploty vzduchu.

Scénář I

Ve scénáři I byly uvažovány změny ročních průměrů teploty vzduchu a průměrů pro zimu a léto (primární charakteristiky). Z metodického hlediska byl založen na porovnání globálních teplot s teplotami v oblasti ČR. Použité verze GCM jsou dnes zastaralé. Předpoklad změny ročního globálního průměru teploty vzduchu při zemském povrchu o $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let je z dnešního pohledu na horní hranici odhadovaných změn. Tento odhad nepočítal s vlivem aerosolů. Podle *Houghton et al. (1996)* by se změna teploty při započtení vlivu antropogenních aerosolů mezi časovými horizonty roků 1990 a 2100 pohybovala v rozmezí od 1 do $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v závislosti na teplotní citlivosti modelu a scénáři emisí skleníkových plynů.

Kromě změn primárních charakteristik obsahoval scénář I rovněž změny 13 sekundárních teplotních charakteristik, které byly vypočítány pomocí předpokládaných změn primárních teplotních charakteristik. Jednalo se o počet dnů v roce s průměrnou denní teplotou $\geq 5, 10, 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, počet dnů v roce s průměrnou denní teplotou $\leq -0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, roční sumu aktivních teplot $> 5, 10, 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, roční sumu záporných teplot, roční počet letních dní, tropických dní, mrazových a ledových dní a dní se silným mrazem.

Výpočet změn těchto charakteristik byl založen na kombinaci metody empirické a GCM. Při vypracovávání scénáře změn sekundárních charakteristik byla přijata řada zjednodušujících předpokladů:

- vycházelo se z jedné hodnoty změny ročního průměru teploty platné pro celé území ČR,
- při zvyšování průměrných teplot jednotlivých sezón se předpokládalo, že změna sekundární charakteristiky bude probíhat stále lineárně (to platí pouze do určitého rozsahu teplotních změn),
- předpokládalo se, že vazby platné v období 1961-1990 se při globálním oteplování nezmění.

V době, kdy nebyly k dispozici denní výstupy z klimatických modelů, poskytl tento postup rozumnou orientaci o možných hodnotách změn, kromě charakteristik s malou četností výskytu.

Na základě scénáře I byly provedeny odhady dopadů změny klimatu na sektory zemědělství, lesy, vodní zdroje a rámcově na další sektory hospodářství.

Scénář II

Scénář II vycházel ze stejného metodického postupu jako scénář I. Byl odvozen na základě starších modelů s nízkou horizontální rozlišovací schopností. Na rozdíl od předešlého scénáře byl rozšířen o změny teploty na jaře a na podzim a pro měsíce leden a červenec.

Změna teploty byla závislá na nadmořské výšce a lokalitě ČR. Závěry o pomalejším růstu teploty v horských oblastech byly odvozeny pomocí empirické metody, na základě teplotních trendů v období 1961-1990. Relace odvozené z určitého období nemusí však být při postupném růstu koncentrací skleníkových plynů a antropogenních aerosolů v atmosféře zachovány. U sekundárních charakteristik byly počítány změny počtu dní s průměrnou denní teplotou nad $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a změna roční sumy těchto teplot.

Hodnoty pro $2\times\text{CO}_2$ klima byly přiřazeny časovému horizontu roku 2030 (předpokládané zdvojnásobení efektivní koncentrace CO_2). Vliv antropogenních aerosolů nebyl uvažován. Scénář byl určen pro studie dopadů změny klimatu na lesy.

Scénář III

Scénář III znamenal kvalitativní krok vpřed. Na rozdíl od předešlých scénářů se díky podpoře Programu územních studií Spojených států vycházelo z podrobnějších modelových údajů (průměrná měsíční teplota, úhrn srážek a globální záření). Validitu modelů bylo možno posoudit do větších detailů. Rovněž referenční období bylo pokryto údaji z daleko většího počtu stanic.

Scénář byl vytvořen pro všechny měsíce roku a poprvé zahrnoval i změnu atmosférických srážek a globálního záření.

Scénář měl dvě varianty. U varianty GISS se $2\times\text{CO}_2$ klima vyznačuje menší roční amplitudou teploty (zima se otepluje více než léto), zvýšeným ročním úhrnem srážek s nižšími přírůstky srážek v letních měsících. Druhá varianta, CCCM, představuje nebezpečnou kombinaci růstu letních teplot a poklesu srážek v této sezóně o cca 10%. Použité modely mají vyšší citlivost (cca $3,5 - 4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), prezentované změny tedy představují horní odhad změn. Časové přiřazení zdvojnásobení koncentrace efektivního CO_2 k roku 2075 je dáno scénářem růstu koncentrací skleníkových plynů v atmosféře podle *Smith et al. (1996)*. Vliv aerosolů nebyl zahrnut.

Počítány byly i změny sekundárních charakteristik. Oproti předešlým scénářům to byly změny dvou agroklimatických indexů, sumy průměrných denních teplot $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a hydrotermického indexu Seljaninova. Pro studie dopadů změny klimatu byla navržena rovněž řada variant přírůstkového scénáře. Tyto byly obohaceny o změny ročního chodu, které hrají při dopadech změny klimatu daleko větší roli než samotná změna ročních hodnot. Poprvé byl použit i stochastický generátor k přípravě řad s denním krokem pro změněné klima. Protože nebyly k dispozici časové řady modelových výstupů, nezahrnoval scénář změny variability.

Scénář byl určen pro studie dopadů změny klimatu na zemědělství, hydrologii a vodní zdroje, lesy a zdraví obyvatel.

Z dnešního pohledu jsou klimatické modely použité pro scénář III zastaralé, metody však zůstávají v platnosti.

Tab. 1a. Dostupné modely a jejich proměnné.

Proměnná	CSIRO	ECHAM4 /OPYC3	HADCM2	CGCM1	GDFI	NCAR	CCSR
rozlíšení	5,625x3,17	2,8125x2,77	3,75x2,5	3,75x3,71	7,5x4,42	7,5x4,42	5,625x3,17
spektrální rozlišení	R21	T42	-	T32	R15	R15	T21
rozměr sítě	64x32	128x64	76x73(72)	96x48	48x40	48x40	64x32
2m průměrná teplota	x	x	x - 1,5m	x	x	x - na povrchu	x - $\sigma=0,995$
2m teplota max	x	x	x - 1,5m	x	-	x	x - $\sigma=0,995$
2m teplota min	x	x	x - 1,5m	x	-	x	x - $\sigma=0,995$
sluneční radiace	x	x	x	x	x	-	x
tlak na hladině moře	x	x	x	x	x-na povrchu	-	-
10m rychlost větru	-	-	x	-	-	-	-
srážky	x	x	x	x	x	x	x
rosný bod	-	x	-	-	-	-	-
relativní vlhkost	-	-	x	-	-	-	-
specifická vlhkost	x	-	-	x	-	-	-
směšovací poměr	-	-	-	x	-	-	x
oblačnost	-	-	-	-	x	-	-

Tab. 1b. Dostupné modely a provedené experimenty.

Experimenty	CSIRO	ECHAM4 /OPYC3	HADCM2	CGCM1	GDFI	NCAR	CCSR
období	1881-2100	1860-2099	1990-2099	1900-2099	-	1900-2035	1890-2099
kotrolní běh	x	x	x	x	x - 1000 let	x	x
GHG	x	x	x-4ens, 1%, 0,5%	x	x - 1958-2057	x	x
GHG + aerosol	x	x	x-4ens, 1%, 0,5%	x - 3ens	x - 1766-2065	x	x
velikost souboru pro desetiletí (MB)	1,31	2,9	3,4	1,7	0,8	0,8	0,9

Scénář IV

Teplotní scénář založený na přímých výstupech modelu ECHAM3/T42 představuje oproti scénáři vytvořenému v rámci Územní studie (scénář III) značný krok vpřed. Z metodického hlediska byl založen na přímých výstupech GCM, použita byla metoda přímé modifikace. Časové řady denních hodnot modelu ECHAM umožnily rozšířit scénář dokonce na změny průměrných denních hodnot a jejich směrodatných odchylek. Poprvé tak byly do scénáře zahrnuty změny variability. Pro odhady dopadů změny klimatu je důležité, že ve scénáři jsou vedle změn průměrných denních teplot zahrnuty i změny denních extrémních teplot, rovněž poprvé v ČR. Charakteristickým rysem scénáře je větší růst teploty vzduchu v létě než v zimě. V experimentu ($2\times\text{CO}_2$ klima) je zahrnut vliv růstu koncentrací skleníkových plynů i antropogenních aerosolů síry. Hodnoty $2\times\text{CO}_2$ jsou přiřazeny časovému horizontu roku 2100. K vytvoření časových řad s denním krokem byl použit stochastický generator.

U atmosférických srážek byl použit scénář přírůstkový, změny globálního záření musely být počítány nepřímo.

Scénář byl určen pro studie dopadů změny klimatu na zemědělství (oblast jižní Moravy) a hydrologický režim (povodí Metuje a Blanice).

Scénář V

Zahrnoval měsíční i denní hodnoty teploty. Změny variability i extrémních jevů jsou v tomto scénáři zachyceny implicitně přes změny cirkulace a velkorozměrné struktury teploty ve volné atmosféře. Výsledky scénáře založeného na metodách statistického downscalingu v nejzákladnějších rysech odpovídají scénáři založenému na přímém výstupu z odpovídajícího GCM (ECHAM3/T42); lze podle nich očekávat oteplení. V mnoha významných aspektech se však od přímého výstupu z GCM liší. Jedná se zejména o:

- Roční chod teploty, zejména měsíc, kdy nabývá teplota maxima (červenec vs. srpen).
- Mésice, kdy dochází k maximálnímu oteplení (podzim vs. léto).
- Všeobecně nižší hodnoty očekávaného oteplení.

Shrnutí změn teploty použitých postupně ve scénářích I až IV

Z přehledu je zřejmé, že scénáře změny klimatu ČR byly zatím omezeny pouze na tři klimatické prvky: teplotu vzduchu, globální záření a atmosférické srážky. Členitý terén západní a střední Evropy a malá rozloha ČR zvyšují potíže s konstrukcí změn atmosférických srážek. Obecným problémem je odhad změn variability a výskytu extrémních jevů. Tyto odhady vyžadují časové řady modelových výstupů, nejlépe s denním krokem. Na takovýchto výstupech byl zatím založen pouze scénář IV, který vycházel z výstupů pouze jednoho modelu. Závěry o vyšší proměnlivosti teploty vzduchu v létě je nutno prověřit u dalších modelů.

Pro ilustraci, jak se v čase vyvíjely hodnoty udávané ve scénářích, jsou v tabulce uvedeny hodnoty změn teploty použité postupně ve scénářích I až IV. Porovnání je jen orientační, hodnoty pro $2\times\text{CO}_2$ klima byly v jednotlivých scénářích přiřazeny různým časovým horizontům v závislosti na vývoji názorů na růst emisí skleníkových plynů. Hodnoty změn byly proto do roku 2030 lineárně interpolovány. Nižší hodnoty u scénáře IV jsou mj. dány tím, že na rozdíl od předchozích scénářů se v experimentu provedeném s modelem ECHAM3/T42 uvažoval i vliv antropogenních aerosolů síry.

Tab. 2. Změna teploty vzduchu (průměru průměrných denních teplot) pro časový horizont roku 2030

Scénář	jaro	léto	podzim	zima	rok
I	-	0,8 - 1,6		2,4 - 4,8	1,2 - 2,4
II	0,9 - 3,4	0,6 - 1,9	0,8 - 2,9	1,1 - 4,0	0,9 - 3,0
III	1,3 - 1,9	1,3 - 1,4	1,5 - 1,9	1,5 - 2,8	1,4 - 2,0
IV	1,0	1,6	1,2	0,9	1,2

Doporučení

Kromě realizace doporučení uvedených u jednotlivých metod vytváření regionálních scénářů se doporučuje:

1. U vybraných modelů získat denní data, navrhnout a prověřit metodiku analýzy změn proměnlivosti teplotních a dalších charakteristik a zohlednit tyto změny ve scénářích.
2. Pro konstrukci dalších scénářů změny klimatu pro území ČR zajistit kvalitní soubory měřených hodnot klimatických prvků: teploty vzduchu (průměrná denní teplota, extrémní denní teploty), atmosférických srážek, vlhkosti vzduchu a rychlosti větru, globálního záření, slunečního svitu. Nedílnou součástí přípravy těchto souborů bude i prověření homogenity řad s krokem kratším než jeden měsíc. Vzhledem k tomu, že v databázi IPCC jsou stoleté modelové simulace, měla by pozornost být rovněž zaměřena na sekulární řady a prověření jejich homogenity. Práce na homogenizaci teplotních a srážkových pozorovacích řad byly již zahájeny.

3. Zhodnocení dosud použitých klimatických a statistických modelů

GCM

Globální klimatické modely jsou, jak již bylo uvedeno, základním zdrojem fyzikálně konsistentních informací pro scénáře změny klimatu. Pro scénáře vztahující se k malým regionům ideální nejsou, a to ani z hlediska horizontálního a časového rozlišení, ani z hlediska poskytovaného spektra klimatických charakteristik potřebných pro odhady dopadů změny klimatu. U modelů posuzovaných v ČR se potvrdily následující obecné rysy GCM:

- GCM vystihují, z hlediska konstrukce regionálních scénářů změny klimatu, nejlépe průměrnou teplotu vzduchu.
- Slabými místy GCM zůstává parametrizace vzniku oblačné vody a ledových krystalků, vypadávání srážek, včetně sněhových, transport vody na zemském povrchu a v půdě. Shoda mezi modelovými a pozorovanými atmosférickými srážkami je z hlediska konstrukce scénářů změny klimatu často nevyhovující.
- Odhalení příčin rozdílných výsledků kontrolních běhů jednotlivých GCM v malých regionech a jejich různého stupně shody se skutečností je, vzhledem k složitému systému parametrizací fyzikálních procesů vzájemně propojených zpětnými vazbami, značně obtížné.
- Časové řady v uzlových bodech GCM nemohou zachytit skutečnou časovou proměnlivost klimatických veličin v detailech. V časových řadách produkovaných GCM nebývají na rozdíl od reálných řad zahrnuty "poruchy" vyvolané takovými vlivy, jako je např. sopečná činnost.
- Časové řady denních hodnot globálních klimatických modelů mají stále vysokou míru neurčitosti, a to i u teploty vzduchu.
- Globální klimatické modely prodělávají velmi rychlý vývoj, současné verze modelů jsou za tři až pět let zastaralé.

Klimatické modely, které byly použity v ČR, odrážejí rychlý vývoj od modelů se směšovací vrstvou k spřaženým modelům atmosféra-oceán. Dokumentují snazší přístup k výstupům GCM, od získání průměrných hodnot měsíčních průměrů klimatických prvků až k časovým řadám denních dat.

Zhodnocení modelů použitých pro scénáře vyvinuté v ČR

- **Modely použité pro scénáře I a II (1992 -1993) jsou zcela zastaralé.** Jednalo se o modely s malým horizontálním rozlišením, se směšovací vrstvou v oceánu: **GISS** - Goddard Institute for Space Studies, **GFDL** - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, **CCC** - Canadian Climate Centre, **OSU** - Oregon State University, **NCAR** - National Center for Atmospheric Research, **UKMO** - United Kingdom Meteorological Office.
- **Projekt "Územní studie změny klimatu České republiky" (1993 - 1995),** znamenal z hlediska dostupnosti modelových dat pro ČR i metodiky konstrukce scénářů nesporný přínos. K dispozici byly **modely CCCT32 (výstup z roku 1989), GISS (1984), GFDLR30 (1989) a GFDLR15 (1991).** Spektrum klimatických prvků (teplota vzduchu a atmosférické srážky) bylo rozšířeno o hodnoty globálního záření. Horizontální rozlišení

modelů bylo kromě modelu GISS vyšší, než v předchozím případě. Poprvé se do ČR dostaly i výstupy klimatického modelu, ve kterém je model atmosféry propojen s cirkulačním modelem oceánu (AO GCM).

Žádný model nedával z hlediska konstrukce scénáře změny klimatu zcela vyhovující výsledky. Vybrané modely rozumným způsobem zachycovaly roční chod teploty vzduchu na území ČR, modelové roční chody srážek se pouze přibližovaly pozorovanému chodu. Vzhledem k tomu, že nebyly k dispozici časové řady modelových hodnot, nebylo možno porovnat mezidenní a meziroční variabilitu.

V současné době jsou verze použitých modelů značně zastaralé. Existují už nové verze s větším rozlišením, se zdokonalenými parametrizacemi procesů tvorby oblačnosti a vypadávání atmosférických srážek, podrobnějším zahrnutím radiačních procesů v atmosféře a termodynamických procesů v oceánu.

- **Klimatický model ECHAM3/T42** měl z dosud použitých modelů největší prostorové ($2,8^\circ \times 2,8^\circ$) a časové rozlišení (1 den). Poprvé byly v ČR k dispozici časové řady modelových výstupů. Denní krok modelových výstupů umožnil porovnat nejen základní charakteristiky polohy statistických rozdělení, ale i míry rozptýlu hodnot a mezidenní proměnlivost. V procesu prověřování validity tak bylo získáno mnohem více podrobností a byla vyzkoušena metodika posuzování (výběr posuzovaných charakteristik). Nejlepší shoda se skutečností byla opět u teplotních charakteristik, zejména u průměrných hodnot. Model podhodnocuje mezidenní kolísání a denní amplitudu teploty. Modelové úhrny atmosférických srážek byly bohužel v oblasti ČR simulovány způsobem pro konstrukci scénáře změny klimatu nevyhovujícím. Ve srovnání s předchozími projekty byly však na shodu modelových a naměřených srážek kladeny daleko vyšší požadavky. Analýza hlavních komponent (PCA) ukázala, že model ECHAM3/T42 dobře simuluje nízkofrekvenční proměnlivost cirkulace nad Evropou a přilehlou oblastí Atlantiku, a to jak v denním, tak v měsíčním měřítku. Studie časového chování výšek hladiny 500 hPa ukázala, že modelová atmosférická cirkulace je perzistentnější než ve skutečnosti, a že synoptické poruchy mají v modelu delší dobu trvání.

Model ECHAM se jeví jako velmi nadějný. Rychle vznikají další verze, v současné době již existují verze ECHAM4 a ECHAM5. Je žádoucí pokusit se získat data alespoň z verze ECHAM4.

U globálních klimatických modelů se doporučuje:

- Provéřit validitu vybraných modelů DDC (k dispozici jsou časové řady s měsíčním krokem) s větším horizontálním rozlišením. U teploty vzduchu a atmosférických srážek připravit soubory statistik, které nejlépe charakterizují chování těchto veličin, a to jak z hlediska prostorové, tak i časové proměnlivosti. Provéřit schopnost modelů vyjádřit stupeň kontinentality klimatu. Připravit programové zabezpečení výpočtu a vizualizace výsledků.
- Připravit metodiku prověření validity dalších prvků, které jsou vyžadovány pro studie dopadů změny klimatu (vítr, parametry vlhkosti). S těmito veličinami se zatím v ČR nepracovalo.
- Připravit a prověřit metodiku porovnávání více realizací téhož modelu s pozorováním.
- Pokusit se u vybraných modelů získat denní data. Připravit metodiku posuzování časové proměnlivosti teplotních a srážkových charakteristik v oblasti ČR. Zatím se s časovými řadami pracovalo pouze u jednoho modelu (ECHAM3/T42) a pouze ve vybraných lokalitách ČR. S výše uvedenými body souvisí i příprava vhodných prostorových teplotních a srážkových charakteristik, které by reprezentovaly celou ČR, popř. přirozené klimatické oblasti ČR.

Zhodnocení validity metody statistického downscalingu

Závěry z provedených analýz lze shrnout takto:

- Metodu statistického downscalingu lze u denních hodnot klimatických prvků použít pro teplotu vzduchu a pro složky větru, nikoliv pro atmosférické srážky. Toto platí jak pro letní, tak zimní období. Pro měsíční průměry teploty lze downscaling použít s úspěchem, pro měsíční úhrny srážek je možno downscaling aplikovat jen v zimní polovině roku. Výše uvedené platí za předpokladu, že jsou prediktory vybrány z veličin popisujících cirkulaci a teplotu ve spodní a střední troposféře.
- Intenzita vztahu mezi prediktory a prediktandy se s časem může měnit.
- Validace cirkulace modelu ECHAM3/T42 ukazuje, že tento model simuluje prediktory pro downscaling s dostatečnou přesností. Validace přízemních teplot a srážek prokázala, že přesnost simulace přízemních klimatických proměnných, především atmosférických srážek, modelem ECHAM není z hlediska konstrukce regionálního scénáře dostačující, což opravňuje použití downscalingu.

Předpoklady downscalingu lze tedy pro přízemní teplotu považovat v dostatečné míře za splněné, a jeho aplikace při konstrukci scénářů je oprávněná.

V dalším období je třeba se soustředit na následující okruhy problémů:

- Zahnutí dalších proměnných mezi prediktory, zejména vlhkostních proměnných.
- Rozšířit cílové proměnné o další veličiny, např. rychlost větru, a pokusit se za pomoci nových metod a dalších prediktorů o zlepšení downscalingu pro atmosférické srážky, a to alespoň pro měsíční úhrny.
- Při validaci výsledků downscalingu klást daleko větší důraz na jejich časovou a prostorovou strukturu (např. časové a prostorové autokorelace, horká / studená / suchá období apod.).
- Použít výstupy z dalších modelů GCM, aby bylo možno odlišit přednosti a nedostatky downscalingu jako metody od předností a nedostatků specifických pro jednotlivé klimatické modely.

Zhodnocení validity stochastického generátoru

Stochastické generátory jsou nejčastěji využívanou metodou konstrukce meteorologických řad s časoprostorovým rozlišením požadovaným v impaktových studiích. Již v rámci projektu Územní studie byl vytvořen stochastický generátor Met&Roll.

Během jednotlivých projektů se projeví následující výhody stochastického generátoru Met&Roll :

- Spolu s přímou modifikací pozorované řady se jedná o jedinou dostupnou metodu, která byla schopna poskytnout řady denních přízemních meteorologických charakteristik s dostatečně věrohodnou statistickou strukturou.
- Libovolná délka stochasticky generované řady umožňuje získat statisticky průkazné výsledky (např. rozložení výnosových charakteristik odvozené z víceleté simulace růstovým modelem) pro daný scénář změny klimatu.
- Rozsáhlé spektrum možných zásahů do statistické struktury řad umožňuje provést detailní citlivostní analýzu, při níž je studován vliv jednotlivých prvků statistické struktury řad na charakteristiky studovaného systému.

Výsledky validace generátoru MET&ROLL odhalily některé nedostatky použitého modelu, týkající se zejména nedostatečné reprodukce variability měsíčních průměrů a výskytu extrémních hodnot. Generátor *podhodnocuje* četnost výskytu dlouhých bezesrážkových období i extrémních denních úhrnů srážek. Při následné validaci variability modelových výnosů však bylo zjištěno, že nedostatky modelu nemají vliv na variabilitu modelových výnosů, generátor je tedy možno použít v simulacích růstovým modelem. Je však třeba zdůraznit, že toto "ověření použitelnosti" se vztahuje pouze na daný růstový model a konkrétní vstupní data. Je totiž známo, že syntetická data dávají v určitých případech špatné výsledky, např. neschopnost generátoru simulovat extrémní srážky vnaší významnou chybu při modelování půdní eroze.

Pokud jde o vývoj stochastického generátoru a jeho využívání k odhadu dopadů očekávané změny klimatu, odpovídá současný stav výzkumu v ČR úrovni výzkumu ve světě, některé prvky lze hodnotit jako progresivní, např. zavedení meziroční variability měsíčních průměrů do stochastického generátoru. Tomuto tématu, zejména po teoretické stránce, je věnována v současné odborné literatuře značná pozornost.

ČÁST III

VÝSLEDKY HOMOGENIZACE ČASOVÝCH ŘAD MĚSÍČNÍCH PRŮMĚRŮ TEPLOT VZDUCHU A ÚHRNŮ ATMOSFÉRICKÝCH SRÁŽEK

1. Úvod

Základním předpokladem analýzy kolísání klimatu je existence dlouhých homogenních časových řad meteorologických prvků. Nejčastěji se pracuje s řadami průměrných měsíčních a ročních hodnot. Měření na meteorologických stanicích však může být negativně ovlivněno některými skutečnostmi, které se ve větší či menší míře promítají do kvality údajů o daném prvku. Informace tohoto typu by měly být uvedeny v dokumentaci ke stanici (tzv. metadatach) a měly by informovat o všech změnách týkajících se:

- polohy stanice a jejího okolí,
- použitých přístrojů, jejich instalace a pozorovacích termínů,
- osoby pozorovatele a pečlivosti výkonu jeho činnosti,
- způsobu výpočtu statistických charakteristik.

Uvedené skutečnosti mohou mít za následek změny v pozorovacích řadách, které nesouvisí se změnami počasí a podnebí, a jsou považovány za *nehomogenity*. Obvykle se jedná o skokové změny v průměru, mohou se však projevit i ve změně rozptylu dané řady. Takovéto nehomogenity v teplotních řadách musí být nejdříve detekovány se zřetelem na jejich statistickou významnost a v následné fázi by měly být z časových řad odstraněny, tj. měla by být provedena *homogenizace* těchto řad.

Jedním z možných přístupů ke studiu změn v klimatické řadě (těch, které jsou výsledkem působení ne-klimatických faktorů,) může být použití statistického testu pro zjištění nehomogenit. Existují dva druhy takovýchto testů: absolutní testy, které pracují pouze s testovanou časovou řadou, a relativní testy, které srovnávají testovanou řadu s jinými dobře korelujícími referenčními řadami. Jako referenční řady mohou být použity i časové řady vzniklé průměrováním jednotlivých řad daného území. U těchto relativních testů se zjišťuje tzv. relativní homogenita, která je definována takto: "Klimatická řada je relativně homogenní vzhledem k synchronizované řadě na jiném místě, když difference teplot (poměry srážek) páru odpovídajících si dvojic hodnot tvoří řadu náhodných čísel, která vyhovuje zákonu chyb". Definice vychází z předpokladu, že kolísání klimatu se projevuje stejně na rozsáhlejších územích.

V rámci třetího dílčího projektu byly získány homogenizované řady měsíčních a ročních hodnot teploty vzduchu a atmosférických srážek z 30 meteorologických stanic za období 1961 až 1998.

Denní průměry teploty vzduchu byly v tomto období počítány jako vážený průměr termínových měření v 07, 14 a 21 hodin středního místního času, přičemž údaj z 21 hodin se započítal s dvojnásobnou vahou. Denní úhrny srážek byly měřeny v 07 hodin ráno středního místního času a zahrnovaly období od 07 hodin včera do 07 hodin dnes.

Práce byly velmi náročné, poněvadž vyžadovaly mnohonásobné opakování homogenizačních postupů a testů po vzetí v úvahu vlivů vyplývajících z metadat nebo po zjištění, že metadata nepodávají vysvětlení pro nehomogenní chování časových řad. V průběhu prací se ČHMÚ snažil na základě dotazů řešitelů doplňovat či upřesňovat metadata, resp. prověřovat správnost výchozích dat v období detekovaných zlomů či při výskytu odlehklých hodnot.

V řadě případů byla znovu prověřována správnost denních dat podle originálních měsíčních výkazů, v případě srážek i podle ombrogramů, pokud pro danou stanicí existovaly. Metadata byla upřesňována nejen podle stávajících záznamů, ale také na základě přímých kontaktů s revizory staniční sítě a dle možnosti i s pozorovateli.

2. Teplota vzduchu

V posledních letech jsou používány dva parametrické testy s velkou schopností detekovat a kvantifikovat náhlé nehomogenity (jednoduché zlomy v průměru). Jedná se jednak o tzv. bivariační test (Bivariate test), vyvinutý Maronnou a Yohaiem (1978) a Alexanderssonův test (Standard Normal Homogeneity Test - SNHT), který byl vyvinut a aplikován též na srážkové řady. V rozsáhlém porovnávání různých testů bylo zjištěno, že tyto dva dosti podobné testy byly zdaleka nejlepší v detekci a datování jednoduchých změn v simulovaných řadách.

K homogenizaci teplotních řad v tomto projektu byla použita metoda SNHT, přičemž ke každé stanici byla vypočítána odpovídající referenční řada vždy ze všech ostatních stanic. Použití takového průměrné referenční řady má své přednosti oproti porovnávání dané stanice s jednou nebo několika okolními stanicemi, protože se minimalizuje chyba způsobená nedetekovanými homogenitami v dané řadě. Navíc z hlediska sestavení referenční řady je důležitá skutečnost, že teplotní řady použitých stanic vykazují v jednotlivých měsících statisticky významné a velmi vysoké korelační koeficienty, které přesahují hodnotu 0,90 (s výjimkou některých měsíců u horských stanic). Metoda SNHT umožnila detekovat jak rok změny v průměru, tak i statistickou významnost a velikost této změny. Pokud se rok nehomogenity shodoval s metadaty udávajícími v té době nějakou změnu na stanici, bylo možné provést homogenizaci řady směrem do minulosti. Tím byla dána možnost připojit k této řadě pokračující měření bez nutnosti provádění korekcí.

Oprava řad byla prováděna tak, že testovaná řada byla opravena o rozdíl průměrů diferencí referenční a testované řady 20 let před a po zlomu, pokud byly hodnoty k dispozici. V řadě případů ovšem ke zjištěným nehomogenitám neexistují žádná metadata, svědčící o změnách na dané stanici. V těchto případech bylo třeba uvážit, zda jde o nezpochybnitelnou nehomogenitu (tj. na stanici došlo k nějaké změně, ta však není zaznamenána) nebo zdánlivou nehomogenitu. Situaci dále komplikuje skutečnost, že určitá změna na stanici nemusí mít nutně stejné důsledky ve všech měsících. S ohledem na výše uvedené okolnosti tak výpověď o relativní homogenitě dané řady a nutnosti homogenizovat nemusí být jednoznačná.

Konkrétní výsledky homogenizace obsahuje tab. 3, v níž je v druhém sloupci uveden počet opravených zlomů v časové řadě a třetím sloupci počet nehomogenit (zlomů), které v řadě zůstaly po provedených opravách. Časové řady ze stanic bez zlomů můžeme považovat za plně homogenní, řady s více zlomy pak za nehomogenní.

Tab. 3. Přehled výsledků homogenizace

Název stanice	Počet opravených zlomů teploty	Počet zlomů po opravách teploty	Známka kvality časové řady srážek (1 - 5)	
			před homogenizací	změna po homogenizaci
Brno, Tuřany	-	3	2	-
Červená	-	2	2	-
Doksany	-	1	1	-
Havlíčkův Brod	6	2	3	2
Holešov	-	3	1	-
Hradec Králové	2	1	1	-
Husinec	-	1	3	3
Cheb	-	1	1	-
Churáňov	-	1	1	-
Klatovy	-	2	1	-
Kostelní Myslová	-	0	3	2
Kralovice	4	3	2	2
Kuchařovice	-	5	1	-
Liberec	-	1	2	-
Lučina	-	1	1	-
Lysá hora	-	1	1	-
Město Albrechtice - Žár	-	6	4	2
Mošnov	-	2	1	-
Olomouc, Slavonín	12	3	5	3
Ondřejov	12	2	5	3
Praha, Ruzyně	12	0	4	2
Přimda	-	2	5	2
Semčice	11	2	2	-
Svratouch	-	0	2	-
Tábor - Náchod	12	0	4	3
Třeboň	4	1	3	-
Ústí nad Orlicí	12	0	4	3
Valašské Meziříčí	-	2	2	-
Velké Meziříčí	30	1	4	3
Žatec	9	0	1	-

3. Atmosférické srážky

Pro homogenizaci úhrnů srážek byla použita metoda nazývaná MASH, která patří mezi relativní testy nehomogenity. Lze pracovat jak s předpokladem homogenity referenční řady, tak i bez tohoto předpokladu. Pro daný účel byla použita varianta, která nepředpokládá homogenitu referenční řady.

Programové vybavení, poskytnuté autorem metody MASH umožňuje srovnávat najednou nejvýše 10 stanic. Jedna z nich se vybere jako testovaná stanice. Jako referenční řadu program zvolí kombinaci nejvýše 4 stanic z dané desetice. Referenční řada se vytváří automaticky na základě matematicky podloženého výběru nejvhodnějších stanic, a to jako vážený součet řad jednotlivých stanic skládajících referenční stanici. V případě překročení kritické hodnoty testu program uvede detekované zlomy, tj. rok zlomu a navrhovanou velikost opravy, včetně konfidenčních intervalů.

Pro homogenizaci byl zvolen následující postup:

- Kromě požadovaných 30 řad bylo pro testy použito dalších 20 pomocných řad, protože síť výchozích 30 řad se jevila jako příliš řídká. Všechny řady byly rozděleny do 8 skupin podle jejich geografické polohy. Některé stanice byly zařazeny do více skupin. Pro základní orientaci a grafické znázornění byla pro každou skupinu vytvořena umělá řada, a to jako průměr hodnot řad ze stanic příslušné skupiny. Umělé řady doplnily výchozích 50 řad na 58 řad.
- Na tyto řady byly aplikovány testy homogenity ročních a kvartálních úhrnů srážek. (Hladina významnosti 0,9 podle metody Monte Carlo). Jako kritická hodnota pro detekci nehomogenit bylo zvoleno 10%.
- Pokud test ročních úhrnů srážek určil řadu jako homogenní a pokud nebyly velmi výrazné nehomogenity ve čtvrtletích, řada byla prohlášena za homogenní a nebyla dále upravována.
- Pokud test ročních úhrnů srážek posoudil řadu jako nehomogenní, byly korekce prováděny na základě výsledků testů jednotlivých čtvrtletí, s přihlédnutím k metadatům. Testování jednotlivých kvartálů mj. umožnilo rozlišit vliv druhu srážek (déšť, sníh) na případné nehomogenity.
- Při opravách jednotlivých řad byla v maximální míře respektována metadata. Pokud byla zjištěna i menší statisticky významná nehomogenita s oporou v metadatach, byla oprava provedena. Pokud opora v metadatach nebyla nalezena, opravovaly se jen velmi výrazné zlomy shodně detekované srovnáním s několika referenčními řadami. Jestliže stanice byla testována v rámci různých skupin a byla vzhledem k jedné skupině homogenní a k ostatním nikoliv, byla označena za homogenní. Opravy nebyly prováděny v případě nehomogenit detekovaných odlišně pro různé referenční řady.

Konkrétní výsledky homogenizace obsahuje dále uvedená tab. 3, v níž je ve čtvrtém sloupci uvedena známka homogenity časové řady stanice a v pátém sloupci známka homogenity po opravě v pětistupňové stupnici. Číslice "1" označuje homogenní časovou řadu, číslice "5" pak nehomogenní.

4. Závěr

Provedením homogenizace nelze proces zkvalitňování teplotních řad v ČR považovat za ukončený. Jako účelné se jeví dodatečné prověření údajů stanic, kde se difference jeví jako zvláště výrazné. Homogenizace se ukazuje problematická zejména v těch řadách, kdy se nehomogenity objevují blízko jejich začátku nebo konce. V těchto případech by bylo třeba rozšířit použité řady před rok 1961 a homogenizaci provést znovu. To platí i na konci těchto řad, zejména v souvislosti se zaváděním automatizovaného měření, kde je však třeba mít k dispozici několik let měření, aby případná nehomogenita v měření mohla být spolehlivě detekována. Provedenou analýzu lze chápat především jako krok k lepšímu poznání teplotních a srážkových časových řad v ČR.

Z pohledu nekorigovaných naměřených teplotních údajů se jako nejproblematictější jeví stanice Kralovice, Kuchařovice, Liberec, Město Albrechtice - Žáry, Olomouc - Slavonín, Ondřejov, Praha - Ruzyně, Semčice, Tábor, Ústí nad Orlicí a Žatec. Podle počtu neodstraněných zlomů lze analyzované stanice rozdělit do několika skupin. Z pohledu relativní homogenity řad je třeba upozornit zejména na stanice s největším počtem neopravených nehomogenit, jako jsou stanice Město Albrechtice - Žáry a Kuchařovice, ale i Brno - Tuřany, Holešov, Kralovice či Olomouc - Slavonín.

Pokud zůstala nehomogenita v řadách ročních průměrů, pak její hodnota nepřesahuje 0,1 - 0,2 °C. Případná absolutní chyba vzniklá nedostatečnou homogenizací řad tak bude v řadách ročních a sezónních hodnot podstatně nižší než v řadách jednotlivých měsíců.

Z výsledků homogenizace srážkových řad vyplývá jako nejproblematictější řada stanice Olomouc-Slavonín. Problematické jsou i stanice Husinec, Ondřejov, Tábor, Třeboň a Velké Meziříčí. Dalšími testy provedenými po odevzdání závěrečné zprávy se ukázalo, že v případě Ústí nad Orlicí lze přetrvávající zlom odstranit aplikací opravy na celý rok místo půl na roku, aniž by se zhoršily celkové výsledky testu. Na rozdíl od teplotních řad byl v případě srážkových řad učiněn pokus o homogenizaci předpokládající možné vlivy klimatických změn na menším území, než je obvyklé. Tak např. je zřejmé, že srážkové řady se chovají poněkud jinak v oblasti Beskyd a Jeseníků. V žádném případě nelze vytvořit jednu referenční srážkovou řadu nejen pro Českou republiku, ale ani pro Čechy nebo Moravu.

Vybraná literatura:

Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M., Conde, J.P. (1988): Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Solar Energy*, 40, 269-279.

- Alexandersson, A. (1995): Homogeneity Testing, Multiple Breaks and Trends. In: Proc. 6th Int. Meeting on Stat. Climatology, Galway, Ireland, 439-441.
- Bardossy, A., Plate, E.J. (1992): Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resources Research*, 28, 1247-1259.
- Boer, G.J., McFarlane, M.A., Laprise, R., Henderson, J.D., Blanchet, J.-P. (1984): The Canadian Climate Centre spectral atmospheric general circulation model. *Atmos.-Ocean*, 22, 397-429.
- Brázdil R., Rožnovský J., 1995: Dopady možné změny klimatu na zemědělství v České rep.: Publikace NKP ČR č.18, Praha, 139 s.
- Brázdil, R., Štěpánek, P. (1998): Kolísání teploty vzduchu v Brně v období 1891-1995. *Geografie - Sborník České geogr. spol.*, 103, 13-30.
- Buchtele J., (1992): Důsledky klimatických změn pro hydrologickou bilanci a vodní zdroje. Zpráva, Praha 19s.
- Buishand, T. A. (1982): Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *J. Hydrol.*, 5, 11-27.
- Corte-Real, J., Zhang, X., Wang, X. (1995): Downscaling GCM information to regional scales: a nonparametric multivariate regression approach. *Clim. Dyn.*, 11, 413-424.
- Crane, R.G., Hewitson, B.C. (1998): Doubled CO₂ precipitation changes for the Susquehanna basin: Downscaling from the GENESIS general circulation model. *Int. J. Climatol.*, 18, 65- 76.
- Dubrovský, M., Žalud, Z., Šťastná, M. (1999): Modelling grain yields with crop growth model (C MAIZE) and weather generator (Met&Rol1). *Climatic Change*.
- Dubrovský, M., Huth, R. (1998): Validation of ECHAM GCM in terms of circulation patterns and their interdiurnal variability. In: Proc. 14th Conf Probab. Stat. in Atmos. Sci., AMS, Phoenix, AZ, 13-16.
- Hansen, J., Russell, G., Rind, D., Stone, P., Lacis, A., Lebedeff, S., Ruedy, R., Travis, L. (1983): Efficient Three-Dimensional Global Models for Climate Studies: Models I a II, *Mon. Wea. Rev.* 3, 609-662.
- Hladný, J. et al., (1996): Dopady možné změny klimatu na hydrologii a vodní zdroje. Publikace NKP ČR č. 137 s.
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (eds.) (1996): *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.
- Huth, R., Kyselý, J. (1998): A GCM simulation of heat waves in central Europe. In: 2nd Int. Climate and History Conf, University of East Anglia, Norwich, UK, 74-75.
- Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S., Rigor, I.G. (1999): Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geoph.*, 37, 173-199.
- Kalvová, J. (1991): Radiačně aktivní plyny v atmosféře a změny klimatu. NKP ČSFR, sv. 3, ČHMÚ, Praha, 73 s.
- Kalvová, J. (1993): Regionální scénář změn teploty pro ČR. Výzkumná zpráva projektu MZ ČR "Posun lesních vegetačních stupňů v ČR v souvislosti s regionálním scénářem klimatické změny". NKP ČR, MZ ČR, Praha, 29 s.
- Kalvová, J. a kol. (1995): Scénáře změny klimatu pro Českou republiku. NKP ČR, sv. 17., ČHMÚ, Praha, 101 s.
- Kalvová, J. et al. (1996): *Climate Change Scenarios for the Czech Republic*. NKP ČR, sv. 24, ČHMÚ, 99 pp.
- Karl, T.R., Williams, C.N. (1987): An Approach to Adjusting Climatological Time Series for Discontinuous Inhomogeneities. *J. Climatol. Appl. Meteorol.*, 26, 1744-1763.
- Karl, T.R., Wang, W.C., Schlesinger, M.E., Knight, R.W., Portman, D. (1990): A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. Part 1: Seasonal statistics. *J. Climate*, 3, 1053-1079.
- Kašpárek L., Krejčová K. (1993): Popis algoritmu programu pro výpočet chronologické hydrologické bilance BILAN. VUV TGM, Praha.
- Kašpárek L. et al. (1996): Vliv změn klimatu na vodní zdroje. Výzkumná zpráva úkolu Metody výpočtu hydrologických dat pro vodní hospodářství a ochranu životního prostředí. VUV TGM, Praha, 55 s.
- Kos, Z. (1992): Vodohospodářské soustavy a jejich matematické modely při měnícím se klimatu. *Vodní hospodářství* 7, 211-216.
- Kos, Z. (1993): Sensitivity of irrigation and water resources systems to climate change. *Hodohosp. čas.*, 247-269.
- Krejčová K., Říčica J., Kašpárek L., Polák M., Zahradníček Z. (1993): Chronologická hydrologická bilance povodí. Výzkumná zpráva. ČHMÚ Praha a VUV TGM, Praha, 150 s.
- Kyselý, J., Kalvová, J. (1998): Porovnání výskytu horkých vln na jižní Moravě s výstupy klimatického modelu ECHAM. *Meteorol. Zpr.*, 51, 136-141.
- Malcher, J., Schonwiese, C.-D. (1987): Homogeneity, Spatial Correlation and Spectral Variance Analysis of Long European and North American Air Temperature Records. *Theor. Appl. Climatol.*, 38, 187-166.
- Marrona, T., Yohai, V. J. (1978): A Bivariate Test for the Detection of a Systematic Change in Mean. *J. Amer. Stat. Assoc.*, 73, 640-645.
- Manabe, S., Wetherald, R. T. (1987): Large scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1211-1235.
- Mitchell, J.M., ed. (1966): *Climatic Change*. WMO, Tech. Note 79, Geneva, 795.
- Moldan, B. et al. (1993): Rizika změny klimatu a strategie jejich snížení, Publikace NKP ČR č. 10, 174 s.
- Moldan, B., Sobíšek B. (1996): Územní studie změny klimatu České republiky (závěrečná zpráva). Publikace NKP ČR č. 22, 165 s.
- Nacházel K., Přenosilová E. (1998): Fuzzy přístup ke zkoumání neurčitosti klimatické změny a jejich dopadů na vodní zdroje. *J. Hydrol. Hydromech.* 46, 264-287.
- Nemešová, I., Kalvová, J. (1997): On the validity of ECHAM-simulated daily extreme temperatures. *Studia geoph. et geod.*, 41, 396-406.
- Nemešová, I., Kalvová, J., Klimperová, N., Buchtele, J. (1998): Comparison of GCM-simulated and observed climates for assessing hydrological impacts of climate change. *Int. J. Hydrol. Hydromech.*, 46, 237-263.
- Peixoto, J. P., Oort, A. H. (1992): *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York, 520 pp.

- Potter, K.W. (1981): Illustration of a New Test for Detecting a Shift in Mean in Precipitation Series. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2040-2045.
- Přenosilová E. (1994): Důsledky klimatických změn na hospodaření s vodou v nádržích. Publikace NKP ČR, č. 16, 96 s.
- Smith, J. B., Huq, S., Lenhart, S., Mata, I., J., Nemešová, I., Toure, S. (1996): Vulnerability and Adaptation to Climate Change. Interim Results from the US. Country Studies Program. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 367 pp.
- Solow, A. R. (1988): Detecting changes through time in the variance of a long-term hemispheric temperature record: an application of robust locally weighted regression. *J Climate*, 1, 290-296.
- Šťastná M. (1998): Parametrization, validation and utilization of the crop growth CERES-MAIZE model Thesis, MZLU Brno
- Trenberth, K. E. (ed.) (1992): Climate System Modeling. Cambridge University Press, Cambridge, 788 pp.
- Vinš B. et al. (1996): Dopady možné změny klimatu na lesy v České republice. Publikace NKP ČR č. 19, Praha.
- Wilks, D.S. (1999): Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. *Agricultural and Forest Meteorology* 93, 153-169.

Report of the National Climate Program of the Czech Republic on the Arrangement Phase of Regular Monitoring of Climate Change and its impacts.

Jaroslava Kalvová, Vít Květoň, Ivana Nemešová, Bořivoj Sobišek, at al, The Czech National Climate Program

Summary

The report contains the Arrangement Phase outputs of the project "Research of Climate Change Impacts Caused by the Increased Greenhouse Effect in the Czech Republic". The project is supported by the Ministry of Environment of the Czech Republic.

The first part deals with the impacts of the climate change on the agriculture, forestry and water management.

In the CO₂ increased climate the higher production of biomass, larger square of the leaves and increased yield can be expected. But the negative consequences can be expected too, and their evaluation is difficult. The changed conditions can bring more pests and diseases. The increased aridity of the agricultural areas cannot be excluded.

Higher production of biomass is supposed also in the forestry. The resulted effect can be from the unimportant growth to the growth of roots, growth of wood or to the combination of these impacts. In each case the equilibrium among the ability of the tree to assimilate and the ability of the root system to ensure the nutrient has to be established. The experiments on the assimilation activity of the trees in the vegetation season were made in the Beskydy mountains and theoretical counts in the simulation models MAESTRO and MAESTRA.

In hydrology the runoff change is very sensible to the precipitation amount and its annual course changes. Relatively very small changes of the average precipitation totals can increase or decrease impact of the expected relatively great changes in the temperature. Approximate decrease of the mean runoff made by the increase of annual temperature by 2 °C can be compensated by an increase of precipitation by 5%. If the precipitation amount remains the same the increase of the temperature by 2 °C would result in decrease of mean runoff by 10-15%. The changes in annual course of runoff can be expected too. In winter the runoff will increase, in spring, summer and autumn decrease. In winter the more often floods occurrence cannot be excluded.

The second part of paper analyses the climate change scenarios prepared for the territory of the Czech Republic in 1992-98. There were constructed four climate change scenarios and one scenario as a methodology. Two of all five were made especially for the study of climate change impacts on the agriculture and hydrological cycle. The review of the methods used for the climate change scenarios design and the scheme of their combination are presented as well. All the concerned scenarios were constructed for the air temperature and two of them also for precipitation and global radiation.

The third part of paper is devoted to the homogeneity testing of the temperature and precipitation data for the Czech Republic. The homogeneity of temperature time series was tested using Standard Normal Homogeneity Test, and if it was necessary the homogenization was performed. The estimation of the remaining inhomogeneities should not exceed 0,2 °C in the most complicated cases. The precipitation time series have been tested using MASH method and the homogeneity of the reference data was not supposed. The territory of the Czech Republic is so complicated that the possibility of one representative precipitation data set for the whole area is impossible. The stations with long data series have been classified according to the results of homogeneity testing.

OČAKÁVANÉ ZMENY KLÍMY A MOŽNÉ DÔSLEDKY NA LESNÚ DREVINU SMREK OBYČAJNÝ (*PICEA ABIES* L. KARST.) NA SLOVENSKU

Jozef Mind'áš⁽¹⁾, Jaroslav Škvarenina⁽²⁾, Katarína Střelcová⁽²⁾, Tibor Priwitzer⁽¹⁾
⁽¹⁾Lesnícký výskumný ústav Zvolen, ⁽²⁾Lesnícka fakulta TU Zvolen

1. Úvod

Smrek obyčajný (*Picea abies* (L.) Karst.) sa v uplynulých dvoch storočiach stal najrozšírenejšou hospodárskou drevinou v západnej a časti stredovýchodnej Európy (Mráček - Pařez 1986). Relatívne jednoduché pestovanie, rýchly rast, vysoká produkcia, široká použiteľnosť jeho dreva, potreba zalesňovania nelesných plôch v spojení so snahami o čo najvyšší výnos z pôdy, viedli k skutočnosti, že sa pestovanie smreka rozšírilo i mimo jeho pôvodný (horský) areál, predovšetkým do stredných a nižších polôh, dokonca aj na nížiny. Ako uvádza Hladík (1996) súčasné zastúpenie smreka (asi 30%) na drevinovom zložení lesov Slovenska sa výrazne líši od jeho pôvodného zastúpenia (asi 8%).

Pestovanie smreka na rozsiahlych plochách mimo svoj prirodzený areál prinieslo lesnému hospodárstvu u nás, ale hlavne v stredozápadnej Európe okrem nesporných výhod, aj početné problémy. Na nevhodných stanovištiach stratil smrek svoju prirodzenú rezistenciu a stal sa málo odolný voči rôznym škodlivým činiteľom. Výraznejšie tu trpí snehovými a veternými kalamitami, ktoré v priebehu 19. a 20. storočia devastovali hlavne jeho monokultúry. K abiotickým (sneh, vietor, sucho) a biotickým škodlivým činiteľom (podkôrny hmyz, mniška) pribúda v 70-tych rokoch nášho storočia ďalší nebezpečný činiteľ - lokálne i regionálne pôsobenie znečisteného ovzdušia. Negatívny vplyv chemicky zaťaženej klímy však rástol geometrickým radom, a tak dnes stojíme nielen pred problémom imisii, ale zdá sa, že aj pred globálnymi zmenami v atmosfére vedúcimi k zmenám klímy (Schlaepfer 1993, Mind'áš - Škvarenina 1994 a iní).

Vzhľadom na očakávané klimatické zmeny, pre ktoré je prognózovaný deficit zrážok, a rast teploty vzduchu LAPIN (1996), sa smrek javí osobitne ohrozenou lesnou drevinou, a to predovšetkým v oblastiach mimo jeho prirodzený areál rozšírenia. Nároky smreka na podmienky prostredia sumarizujú napr. Schmidt - Vogt (1977), Pagan (1992), Mind'áš (1997) a iní. Z uvedených prác rezultuje jeho vysoká náročnosť na vodu, ako aj ekologická viazanosť na pomerne chladnú horskú klímu.

Cieľom tejto práce je zhodnotenie vplyvu klimatických zmien na súčasný a budúci výskyt smreka s použitím rôznych metodických postupov. Ich vzájomnou komparáciou sme sa snažili získať vierohodné výsledky pre zodpovedanie otázok najmä z pohľadu perspektív ďalšieho pestovania smreka v oblasti západných Karpát.

2. Metodika

Pôsobenie očakávaných klimatických zmien na bioklimatické podmienky výskytu smreka v oblasti západných Karpát sme sa snažili zhodnotiť a prognózovať podľa objektívnych kritérií a štyroch odlišných metodických postupov. Preto sme sa v tejto práci zamerali na:

- zhodnotenie dôsledkov zmien klímy prostredníctvom analýzy zmien výskytu vegetačných formácií pomocou modelu "Holdridge life zone classification model" pre smrek,
- analýzu zmien bioklimatického areálu smreka vo vzťahu k jeho súčasnemu výskytu,
- využitie FOREST GAP modelu pre predikciu zmien zastúpenia a produkcie smreka ako odozvu na klimatické zmeny,
- zrážkovú zabezpečenosť smreka počas mesiacov máj - august, kedy dochádza k najväčšej spotrebe vody pri fyziologických procesoch spojených s tvorbou biomasy.

2.1 Scenáre klimatickej zmeny na Slovensku

Na kvantifikáciu klimatickej zmeny pre stav $2\times\text{CO}_2$, ktorý je možné očakávať okolo roku 2070, sme použili odvodené scenáre zmeny klímy pre územie Slovenska (LAPIN *et al.* 1995). Tieto hodnoty sa odvodili z modelov všeobecnej cirkulácie ovzdušia (GCMs), konkrétne ide o modely CCCM (Canadian Climate Centre Model), GISS (Goddard Institute for Space Studies) a GFD3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). Regio-

nálnu analýzu a interpretáciu výsledkov týchto modelov urobil LAPIN *et al.* (1995) a výsledky sú prezentované v tab. 1 a 2. Pri niektorých analýzach sa využili aj novšie scenáre odvodené v r.1999-2000 (Tab.1, CCCM*).

Tab. 1 Mesačné územné priemery teploty vzduchu (°C) pre územie Slovenska (Tn) (obdobie 1951-80) a regionálna modifikácia odchýlok mesačných priemerov ($dT = T_{\text{scenário}} - T_n$) pre GCMs scenáre $2xCO_2$ (CCCM, GISS, GFD3)

Table 1. Monthly spatial averages of air temperature (°C) for Slovakia (Tn) (period 1951-80) and regional modifications of average monthly air temperature differences ($dT = T_{\text{scenário}} - T_n$) for GCMs scenarios $2xCO_2$ (CCCM, GISS, GFD3)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Tn	-3,8	-1,8	2,2	7,7	12,5	16,1	17,5	16,8	13,0	8,0	3,0	-1,5
dT	Odchýlka teploty vzduchu											
CCCM	3,7	4,5	4,3	3,2	2,9	3,0	3,3	3,2	3,6	3,4	2,7	2,8
GISS	5,7	5,4	5,0	3,9	3,2	2,6	2,4	2,4	3,6	4,5	4,7	5,1
GFD3	2,6	4,1	5,1	4,9	4,8	4,5	4,3	4,0	4,6	4,7	4,1	3,8
CCCM*	2,2	2,9	2,8	2,3	2,3	2,9	3,4	3,6	3,6	3,0	2,0	1,8

*verzia 2000

Tab. 2 Mesačné územné priemery zrážok (mm) pre Slovensko (Rn) (obdobie 1951-80) a regionálna modifikácia kvocientov priemerných mesačných zrážok ($Rq = R_{\text{scenár}}/R_n$) pre GCMs scenáre $2xCO_2$ (CCCM, GISS, GFD3), N - Severná časť Slovenska, S- Južná časť Slovenska

Table 2. Monthly spatial averages of precipitation (mm) for Slovakia (Rn)(period 1951-80) and regional modifications of quotients of average monthly precipitation ($Rq = R_{\text{scenário}}/R_n$) for GCMs scenarios $2xCO_2$ (CCCM, GISS, GFD3), N - Northern part of Slovakia, S- Southern part of Slovakia

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Rn	44	44	42	53	71	98	93	79	54	53	61	56
Rq												
CCCM-N	1,32	1,17	1,01	1,10	0,94	0,99	0,88	0,87	0,87	1,18	1,27	1,35
CCCM-S	1,29	1,02	1,15	1,04	0,85	0,83	0,79	1,03	0,91	1,11	1,16	1,22
GISS-N	1,16	1,31	1,27	1,34	1,18	1,07	1,08	1,06	0,84	1,25	1,31	1,04
GISS-S	1,16	1,24	1,26	1,28	1,18	1,07	1,20	1,19	0,80	1,28	1,29	1,06
GFD3-N	0,95	1,44	1,08	1,13	1,07	0,99	0,84	1,19	1,36	1,45	1,44	1,01
GFD3-S	0,90	1,50	1,06	1,08	1,03	0,99	0,81	1,39	1,28	1,33	1,43	0,96

2.2 Holdridge model

Holdridge model predstavuje bioklimatický klasifikačný systém určený pre hlavné komplexy ekosystémov (HOLDRIDGE 1967). Pre modelovanie zmien klimatických podmienok lesných spoločenstiev sme použili fortranovskú úpravu Holdridge modelu (U.S. CSP 1994), ktorý na základe 3 klimatických charakteristík definuje charakteristické lesné spoločenstvá v globálnom meradle, a to ako v smere horizontálnom (podľa zemepisnej šírky), tak aj v smere vertikálnom (podľa nadmorskej výšky). Klasifikačnými klimatickými charakteristikami sú:

- priemerná ročná biotepnota (teplotná suma nad 0 °C predelená dĺžkou obdobia)
- priemerný ročný úhrn zrážok
- pomer potenciálnej evapotranspirácie k ročnému úhrnu zrážok

2.3 Analýza bioklimatických areálov drevín

Bioklimatické areály lesných drevín a ich spoločenstiev vo vzťahu ku klimatickým zmenám nadväzuje na doterajšie práce, ktoré analyzovali výsledky prirodzeného rozšírenia lesných drevín na Slovensku (BLATTNÝ,

ŠŤASTNÝ 1959) vo vzťahu k vertikálnym zmenám klímy (MINDÁŠ 1992, MINDÁŠ 1993). Ďalší metodický postup vychádzal z nasledovných krokov:

1. stanovenie klimatických areálov jednotlivých drevín
2. spracovanie obrazu GIS (v IDRISI) - plošná distribúcia biotploty na území Slovenska
3. klasifikácia územia Slovenska na základe hraničných hodnôt biotploty pre jednotlivé vybrané dreviny pre podmienky súčasnej klímy a pre vybrané scenáre klimatickej zmeny
4. plošná analýza výskytu klimaticky definovaných lesných spoločenstiev a ich vzájomná komparácia

Na účely detailnejšieho hodnotenia vplyvu klimatických zmien na lesné dreviny sme definovali index priemernej ročnej teploty vzduchu (IT), a to nasledovným spôsobom:

$$IT = (T_{opt} - T)/(0,5 \cdot dT),$$

kde T_{opt} je hodnota priemernej ročnej teploty vzduchu optimálnej pre danú drevinu, T je priemerná ročná teplota vzduchu lokality výskytu danej dreviny a dT je amplitúda priemernej ročnej teploty vzduchu pre prirodzený areál rozšírenia danej dreviny v oblasti západných Karpát. Index IT dosahuje hodnotu -1 na dolnej hranici prirodzeného rozšírenia, hodnotu 0 pre stred areálu (teplotné optimum) a hodnotu +1 na hornej hranici prirodzeného rozšírenia.

Podobne sme definovali aj index "vodnej bilancie" (IQ):

$$IQ = (Q - Q_{opt})/(0,5 \cdot dQ),$$

kde význam jednotlivých symbolov je podobný ako pri teplote vzduchu. Hodnota Q predstavuje rozdiel ročných zrážkových úhrnov a výparu z lesa, ktorý bol stanovený podľa metódy prof. TOMLAINA (1999)

2.4 Forest Gap model

Forest Gap modely sú zahrňané do skupiny dynamických modelov, ktoré sú schopné prognózy rôznych charakteristík lesných drevín v časových sériách. Gap modely sú založené na simulácii prirodzeného zmladenia, rastu a mortality každého stromu na skúmanej ploche (BOTKIN *et al.* 1972).

Odozva jednotlivého stromu k ekologickým podmienkam na danej ploche je definovaná environmentálnymi funkciami odozvy, všeobecne vyjadrených podielom ovplyvnenia optimálneho rastu v relatívnom rozsahu 0 až 100%. Tieto environmentálne funkcie odozvy boli definované použitím rozličných metód. Podrobný rozbor a teoretické základy týchto metód je možné nájsť v prácach: SHUGART (1984) a SMITH *et al.* (ex U.S. COUNTRY STUDY 1994).

Na stanovenie klimatických hodnôt pre stav $2 \times \text{CO}_2$, ktorý sa očakáva okolo roku 2070, sme použili výsledky regionálnych scenárov klimatickej zmeny pre územie Slovenska (kapitola 2). Vychádzali sme z hodnôt získaných podľa CCCM (Canadian Climate Centre Model) modelu, ktorý najlepšie simuluje súčasné teplotné pomery pre stav $1 \times \text{CO}_2$.

Pre účely tejto práce sme použili verziu Forest Gap Modelu vypracovanú Smithom zo State University of Virginia (U.S. COUNTRY STUDY 1994). Do modelu vstupovali nasledovné údaje pre jednotlivé lesné dreviny:

- maximálny vek dreviny
- maximálna hrúbka $d_{1,3}$
- maximálna výška
- parametre prirodzeného zmladenia drevín

Tento model obsahuje niekoľko funkcií odozvy, ktoré sú popísané v nasledovnom stručnom prehľade:

Environmentalne faktory	FUNKCIA ODOZVY VYJADRENÁ AKO
SVETLO VODNÁ BILANCIA KLÍMA	• 3 triedy - tienne, polotienne, slnné • Minimálny pomer PET pre jednotlivé dreviny • Limitné hodnoty biotploty (MAX, MIN) for prirodzený výskyt jednotlivých drevín

2.5 Zrážková zabezpečenosť smreka

V bioklimatológii rastlín sa pod zrážkovým zabezpečením rozumie v užšom zmysle množstvo zrážok v určitom období, pri ktorom rastlina netrpí nedostatkom vody, resp. jej množstvo je ešte postačujúce pre úspešný vývoj rastliny (KREČMER 1980).

Pri hodnotení zrážkovej zabezpečivosti smreka sme použili úhrny zrážok z vegetačného obdobia (máj - august) merané v rokoch 1984 - 1999 na vybraných staniciach SHMÚ na strednom Slovensku (podľa údajov SHMÚ). Z vyššie uvedeného vyplýva, že by nebolo vhodné posudzovať zabezpečenosť smreka zrážkami len vo vzťahu ku zrážkovým normám. Za limitnú hodnotu (ZL) pre pestovanie smreka sme preto zvolili 300 mm ako kumulatívny úhrn zrážok vegetačného obdobia (mesiace máj - august). Uvedený údaj je akceptovaný väčšinou autorov (NEBE & RZEZNIK 1967; AMBROS 1971; SCHMIDT-VOGT 1977; MRÁČEK & PAŘEZ 1986), nakoľko vychádza z analýzy klimatických pomerov okrajového výskytu smreka v strednej Európe.

3. VÝSLEDKY

3.1 Analýza bioklimatického areálu smreka

Bioklimatický areál smreka obyčajného (*Picea abies* L.Karst.) možno na základe analýzy jeho prirodzeného výskytu v západných Karpatoch charakterizovať nasledovným rozpätím hodnôt klimatických veličín (MINĐÁŠ 1997):

T_{ROK}	T_{VII}	P_0	P_5	R_{ROK}	R_{IV-IX}
3,6-5,0	13,4-14,7	231-246	164-186	1070-1180	485-760

t_R - priemerná ročná teplota vzduchu, t_{VII} - priemerná júlová teplota vzduchu, P_0 - priemerný počet dní s $t_d > 0^\circ\text{C}$, P_5 - priemerný počet dní s $t_d > 5^\circ\text{C}$, R_{ROK} - priemerný ročný úhrn zrážok, R_{IV-IX} - priemerný úhrn zrážok v letnom polroku (IV - IX)

Pri stanovení klimatických amplitúd jednotlivých lesných drevín na Slovensku sme vychádzali s doterajších prác, ktoré analyzovali výsledky prirodzeného rozšírenia lesných drevín na Slovensku (BLATTNY, ŠTASTNÝ 1959) vo vzťahu k vertikálnym zmenám klímy (MINĐÁŠ 1992, MINĐÁŠ 1993). Výsledky sú prezentované na obr. 1. Pre potreby tejto práce sme hodnoty klimatických amplitúd prepočítali pre biotepлотu, hodnoty ktorej sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3 Hraničné hodnoty biotepлотy pre klimaticky podmienený výskyt jednotlivých hlavných drevín
Table 3 Limited biotemperature values for climatically influenced occurrence of individual main tree species

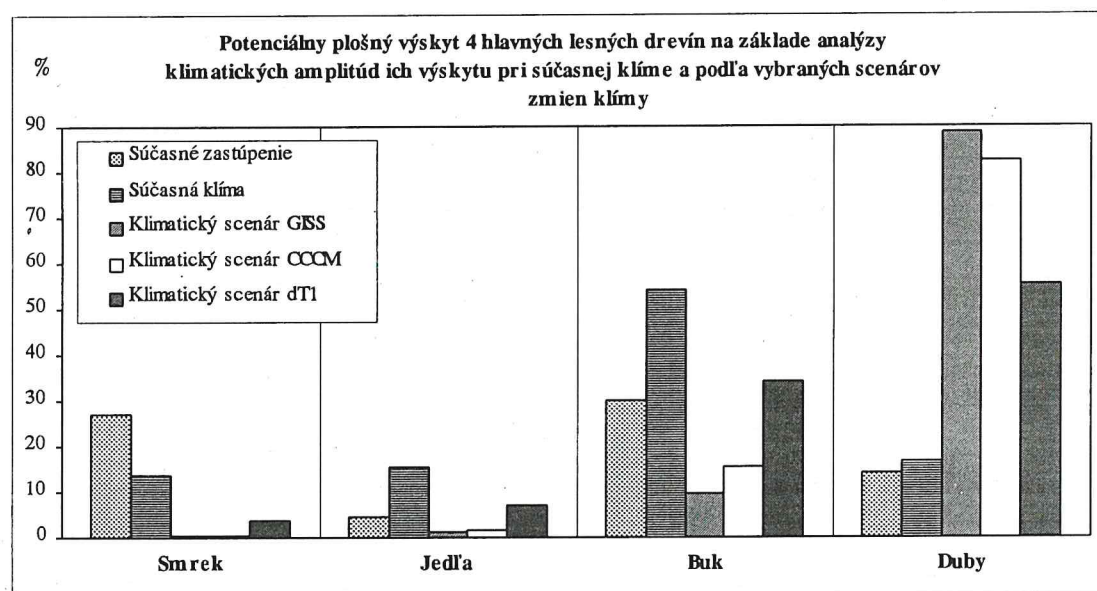
Číslo legenda	Klimaticky podmienený vertikálny výskyt jednotlivých hlavných drevín	Hraničná hodnota biotepлотy	
		$^\circ\text{C}$ Max	$^\circ\text{C}$ Min
0	územie nepokryté v súčasnosti lesom	-	-
1	alpínske spoločenstvá, sporadicky kosodrevina	2.0	0.0
2	pásmo kosodreviny, zákrpky smreka	3.0	2.0
3	medzernatý smrekový les, kosodrevina, jarabina	3.8	3.0
4	horské pásmo čistého smreka	4.5	3.8
5	smrek, buk, sporadicky jedľa	5.1	4.5
6	smrek, buk, jedľa	7.0	5.1
7	smrek, buk, jedľa, dub	7.5	7.0
8	buk, jedľa, dub, hrab	8.4	7.5
9	buk, dub, hrab	9.2	8.4
10	dub, hrab	12.2	9.2
11	spoločenstvá s klimatickými nárokmi, ktoré sa v súčasnosti u nás nevyskytujú	?	12.2

Biotepлотa = Suma kladných teplôt /365 (Holdridge 1967)

Na základe definovaných klimatických areálov jednotlivých drevín podľa biotepлотy (Biotepлотa = Suma kladných teplôt /365 (HOLDRIDGE 1967)) sa v geografickom informačnom systéme IDRISI stanovilo prie-

mené plošné pokrytie klimaticky definovaných spoločenstiev hlavných lesných drevín pre pomery súčasnej klímy a tiež pre podmienky jednotlivých scenárov. Sumárne výsledky sú prezentované na obr. 1, kde okrem potenciálneho plošného výskytu lesných spoločenstiev hlavných lesných drevín uvádzame aj výsledky rámcového prepočtu pre plošný výskyt štyroch hlavných drevín (smrek, jedľa, duby, buk). Prezentované výsledky signalizujú dramatické zmeny v bioklimatických areáloch drevín najmä pre scenáre GISS a CCCM, aj pre najmiernejší scenár zmien teploty vzduchu ($\Delta T1$) sú však tieto zmeny markantné. Výsledky naznačujú, že v horizonte roku 2075 budú bioklimatické podmienky najviac vyhovovať spoločenstvám dubov, ktorých potenciálne zastúpenie by dosahovalo 55 - 88%, pre spoločenstvá buka by to bolo 10 - 34%, pre smrek 0,5 - 4% a pre jedľu 1,5 - 7,5 % (uvádzané percentuálne hodnoty sú brané len pre uvedené 4 dreviny, nie pre celkovú plochu lesov).

Na základe poznatkov o klimatických areáloch jednotlivých drevín sa pomocou analýzy v rámci geografického informačného systému IDRISI stanovilo priemerné plošné pokrytie klimaticky definovaných spoločenstiev hlavných lesných drevín pre pomery súčasnej klímy a tiež pre podmienky jednotlivých scenárov.



Obr. 1 Výsledky analýzy bioklimatických areálov pre hlavné lesné dreviny podľa bioteploty

Fig. 1 Results of the bioclimatic ranges analysis for the main forest tree species according to biotemperature

Zmenu bioklimatických areálov sme ďalej skúmali pomocou dvoch indexov (IT, IQ), ktoré predstavujú najdôležitejšie klimatické faktory vo vzťahu k lesným spoločenstvám, a to teplotu vzduchu a vodnú bilanciu (Fischlin et al. 1995). Výpočet sa robil v gridovom rozlíšení 250x250 m pre prevládajúcu drevinu v danom štvorci. Vstupné údaje sú charakterizované v tab. 4.

Pre výsledné zhodnotenie vypočítaných indexov IT a IQ sme vychádzali z predpokladu, že pôsobenie týchto klimatických faktorov zodpovedá zhruba Gaussovmu rozdeleniu (VINŠ et al., 1996) a vzhľadom na rozsah týchto indexov pre prirodzené areály drevín (-1, +1), môžeme optimum stotožniť zhruba s intervalom smerodajnej odchýlky ($-\sigma$, $+\sigma$) v Gaussovom normálnom rozdelení, ktorý zahŕňa asi 67% rozsahu súboru náhodnej premennej. V našom prípade teda tento interval predstavuje hodnotu intervalu (-0,6, +0,6) (Tab. 5).

Tab. 4 Hodnoty amplitúd a optimálnych priemerných ročných teplôt vzduchu (*T*) a priemernej ročnej vodnej bilancie (*Q*) pre vybrané dreviny v oblasti Západných Karpát

Table 4 Values of amplitudes and optimal mean annual temperatures (*T*) and values of annual water balance (*Q*) for selected tree species in the Western Carpathians region

Drevina	T _{opt} (°C)	dT (°C)	Q _{opt} (mm)	dQ (mm)
Smrek	4,3	4,9	676	850
Jedľa	5,5	3,0	489	700
Smrekovec	4,3	4,2	800	800
Limba	2,4	1,4	1050	200
Kosodrevina	1,5	2,4	1100	370
Buk	5,8	6,8	515	710
Javor horský	6,5	4,8	507	650
Jaseň štíhly	7,0	4,0	320	650
Jarabina	3,0	3,0	700	500

Tab. 5 Relatívna stupnica hodnotenia bioklimatických indexov IT a IQ vo vzťahu k zmene bioklimatických podmienok.

Table 5 Relative scale of bioclimatic indexes IT and IQ evaluation in relation to the change of bioclimatic conditions

Hodnotenie podmienok	Stupeň	IT	IQ
Optimálne	1	<-0,6,+0,6>	<-0,6,+0,6>
Vyhovujúce	2	<-0,9,-0,6> (+0,6,+0,9)	<-0,9,-0,6> (+0,6,+0,9)
Okrajové	3	<-1,2,-0,9> (+0,9,+1,2)	<-1,2,-0,9> (+0,9,+1,2)
Nevhodné	4	<-1,5,-1,2> (+1,2,+1,5)	<-1,5,-1,2> (+1,2,+1,5)
Mimoriadne nevhodné	5	<-∞,-1,5> (+1,5,+∞)	<-∞,-1,5> (+1,5,+∞)

Sumárne výsledky hodnotenia bioklimatických areálov pre súčasnú klímu a podmienky klimatickej zmeny pre dreviny v modelovej oblasti sú uvedené v tab. 6 podľa relatívnej stupnice ako hodnoty percent plochy lesov SR. Treba ešte poznamenať, že v tomto prípade použitý klimatický scenár (dT1, dR3) predstavuje dolnú hranicu odhadu klimatických zmien na území Slovenska a je na úrovni súčasných trendových zmien teploty vzduchu a zrážok. V tomto zmysle ide teda aj o dolný odhad zmien bioklimatických podmienok jednotlivých drevín, ktorých pravdepodobnosť naplnenia je takmer istá, ale môže byť a pravdepodobne aj bude ešte výraznejšia.

Situácia v celoslovenskom rámci, kde sme na základe údajov v gridovom rozlíšení 250x250 m urobili výpočet indexov IT a IQ, sa hodnotila pre tri hlavné dreviny Slovenska smrek, jedľa a buk. Sumárne výsledky sú prezentované v tab. 6. Z hodnotenia jednoznačne vyplýva, že už v súčasnosti je najmä pri smreku a jedli nesúlads medzi ich bioklimatickými nárokmi a skutočným výskytom. Markantne sa to prejavilo v hodnotách pre podmienky klimatickej zmeny, kde v stupni 3-5 indexu IT sa nachádza 71% plochy smreka, 82% plochy jedle a 32% plochy buka. Index IQ signalizuje najväčšie zmeny pre buk na jeho dolnej hranici.

Kľúčovou otázkou je identifikovať procesy akými budú dreviny reagovať na zmenu bioklimatických podmienok. Cenné poznatky v tomto smere priniesli analýzy provenienčných pokusov, ktorých analýza vo vzťahu ku klimatickej zmene identifikovala predovšetkým zvýšenú mortalitu a zmeny v rastovom procese (MATYAS 1994, ŠINDELÁŘ 1993). Podobné modelové analýzy sú postavené predovšetkým na poznatkoch ekologických (v tomto prípade bioklimatických) nárokov jednotlivých druhov resp. spoločenstiev a v súčasnosti výsledky týchto modelov na národnej aj regionálnej úrovni predstavujú základ hodnotenie impaktov klimatických zmien a následnej potreby prijímania adaptačných opatrení v lesníctve (LENIHAN, NEILSON 1993, NEILSON 1993, NOBLE 1993).

Tab. 6 Výsledky hodnotenia bioklimatických indexov teploty vzduchu a vodnej bilancie pre lesy Slovenska.
Table 6 Results of bioclimatic indexes of air temperature and water balance evaluation for Slovak forests

SMREK	Súčasnú klimatické podmienky		Klimatický scenár (dT1, dR3)		Klimatický scenár CCCM*
	IT	IQ	IT	IQ	IT
1	78.8 %	68.8 %	22.2 %	55.9 %	0.0 %
2	13.9 %	21.4 %	17.3 %	22.2 %	0.4 %
3	5.8 %	8.4 %	4.1 %	17.3 %	2.4 %
4	1.1 %	1.1 %	0.5 %	4.1 %	10.7 %
5	0.4 %	0.2 %	21.9 %	0.5 %	86.5 %
3 - 5	7,3 %	9,7 %	71,4 %	21,9 %	96,6 %

*verzia 2000

Stupeň planárny a kolínny

Výsledky naznačujú, že v horizonte roku 2075 budú bioklimatické podmienky v tomto stupni najviac vyhovovať spoločenstvám dubov, ktoré tu budú mať dominantné postavenie. Bioklimatický areál smreka sa v tomto stupni vyskytovať nebude.

Stupeň submontánny a montánny

Bioklimatické podmienky v tomto stupni budú najviac vyhovovať spoločenstvám buka, v submontánnom stupni budú ešte vhodné podmienky aj pre zastúpenie duba. Horná hranica montánneho stupňa zhruba korešponduje s hranicou bioklimatického areálu smreka. Sporadicky by sa tu teda mohol vyskytovať aj v budúcnosti.

Oblasť supramontánna

Táto oblasť zahŕňa súčasné bioklimatické optimum výskytu smreka obyčajného. Pre podmienky klimatickej zmeny sa toto optimum posunie až do oblasti subalpínskej. V spodnej časti tejto oblasti sa zlepšia podmienky pre výskyt buka a jedle.

3.2 Holdridge model

Stupeň planárny a kolínny

Bioklimatické podmienky dnešných spoločenstiev planárneho a kolínneho stupňa na Slovensku sú podľa Holdridge modelu: "chladná temperátna step" a "chladný temperátny mierne vlhký les". Nevytvárajú trvalo vhodné prostredie pre smrekové porasty. Klimatické zmeny podľa uvedených scenárov klimatických zmien umožnia vznik nového, doteraz na našom území nejestvujúceho spoločenstva - "teplý temperátny (nižší montánny) suchý les!". Táto vegetačná formácia (teplý temperátny suchý les) má doteraz svoj výskyt v klimatických podmienkach južných častí Maďarska, Vojvodiny, na severných svahoch Dinárskych Álp a v južnej časti Rumunských Karpát. Tam je toto spoločenstvo označované aj ako teplé dubové lesy. V pôvodnej klasifikácii najrozšírenejšie spoločenstvo (chladný temperátny mierne vlhký les) rozlohu svojich bioklimatických podmienok výraznejšie nezmení, avšak modelový výstup predpokladá jeho ústup z nížin a posun smerom do nízkych výšín. Preto z analýzy vyplýva, že v polohách do 500 m nemožno ani v budúcnosti očakávať klimatické podmienky pre úspešnú produkciu smreka obyčajného.

Stupeň submontánny a montánny

V podmienkach dnešnej klímy tento výškový pás zaberajú spoločenstvá "montánny mierne vlhký les" v jeho dolnej časti a spoločenstvá "subalpínskeho vlhkého lesa" v hornej časti. Podľa AMBROSA (1971) práve v tomto pásme dosahuje smrek klimaticky podmienené produkčné maximum. Klimatická zmena podľa scenára CCCM podmiení posun spoločenstva "montánneho mierne vlhkého lesa" až po izolíniu 1000 m n. m. Bioklimatické podmienky pre listnaté druhy (hlavne pre buk lesný) sa podstatne zlepšia, na druhej strane však povedú k poklesu zastúpenia smreka.

Oblasť supramontánna

Pre podmienky súčasnej klímy sa okrajovo vyskytuje „subalpínsky vlhký les“, vyššie „subalpínsky veľmi vlhký les“ až po hranice „alpínskej veľmi vlhkej horskej tundry“. Pôsobením klimatických zmien sa podmienky uvedených bioklimatických vegetačných formácií radikálne zmenia. Zanikne spoločenstvo „subalpínsky vlhký les“ a na jeho súčasnom aeráli sa vytvoria podmienky pre doteraz málo rozšírené spoločenstvo „montánneho vlhkého lesa“. Podobne aj v pásme „alpínskej veľmi vlhkej horskej tundry“ sa oproti dnešku zmenia klimatické podmienky na „subalpínsky veľmi vlhký les“. V uvedených spoločenstvách sa vplyvom modelovaných klimatických zmien vytvoria bioklimatické podmienky vhodné pre zmiešané spoločenstvá smreka. V dnešnom spoločenstve „alpínskej veľmi vlhkej horskej tundry“ sa vplyvom klimatickej zmeny vytvoria bioklimatické podmienky pre subalpínske smrekové spoločenstvá, skutočné ekologické podmienky pre úspešný rast smreka však budú pravdepodobne limitované pôdnymi a geomorfologickými podmienkami.

3.3 Forest Gap model

Tento model bol aplikovaný doteraz pre 5 lokalít (lesné spoločenstvá v rôznych nadmorských výškach) na území západných Karpát. Čiastkové výsledky týchto modelových výpočtov boli publikované v práci MINĐÁŠ *et al.* (1996). V tejto práci sme sa zamerali na syntézu a doplnenie týchto výsledkov z pohľadu vertikálneho výskytu smreka a to najmä na jeho hornej hranici výskytu.

Modelové výpočty sa realizovali na dvoch typických lokalitách v modelovom území Nízkych Tatier, ktoré reprezentujú prirodzené zonálne lesné spoločenstvá Západných Karpát (horské smrekové spoločenstvá a porasty kosodreviny nad hornou hranicou lesa). Ich základné charakteristiky sú uvedené v tab. 7.

Charakteristiky jednotlivých drevín (maximálny vek, maximálna hrúbka a výška) sa získali z pozorovaní v porastoch v závere Lomnistej doliny a konfrontovali sa s údajmi zistenými v prírodných rezerváciách (KORPEL 1989). Vplyv klimatickej zmeny je v modeli zabudovaný prostredníctvom klimatických amplitúd jednotlivých drevín na základe analýz areálov ich rozšírenia (MINĐÁŠ 1998).

Tab. 7 Základné charakteristiky vybraných lokalít pre použitie Forest Gap Modelu

Table 7 Basic characteristics of selected sites for Forest Gap model application

Lokalita	Nadmorská výška [m n.m.]	Priemerná ročná teplota [°C]	Ročný úhrn zrážok [mm]	Dominantné dreviny
Nízke Tatry	1 300	3,2	1 030	<i>Picea abies</i> <i>Fagus sylvatica</i>
Nízke Tatry	1 700	1,0	1 330	<i>Sorbus aucuparia</i> <i>Pinus mugo</i>

Na stanovenie klimatických hodnôt pre stav 2xCO₂, ktorý sa očakáva okolo roku 2075, sme použili výsledky regionálnych scenárov klimatickej zmeny pre územie Slovenska (Lapin *et al.* 1995), z ktorých sme použili hodnoty podľa CCCM (Canadian Climate Centre Model) modelu.

Modelové simulácie (Obr. 2) poukazujú na významné zmeny vo výskyte a potenciálnej produkcii lesných drevín na skúmaných stanovištiach, najdôležitejšie výsledky sú zhrnuté v nasledovných bodoch:

Oblasť horských zmiešaných lesov - Nízke Tatry 1 300 m n.m.

- výrazné zvýšenie výskytu buka a cenných listnáčov
- takmer úplná absencia zastúpenia smreka
- zvýšenie celkovej produkcie biomasy (20 - 30%)

Oblasť kosodrevinového pásma nad hranicou lesa - Nízke Tatry 1 700 m n.m.

- výrazné zvýšenie zastúpenia stromových druhov
- dominantnosť zastúpenia smreka
- ústup kosodreviny
- výrazné zvýšenie celkovej produkcie biomasy (200 - 300%)

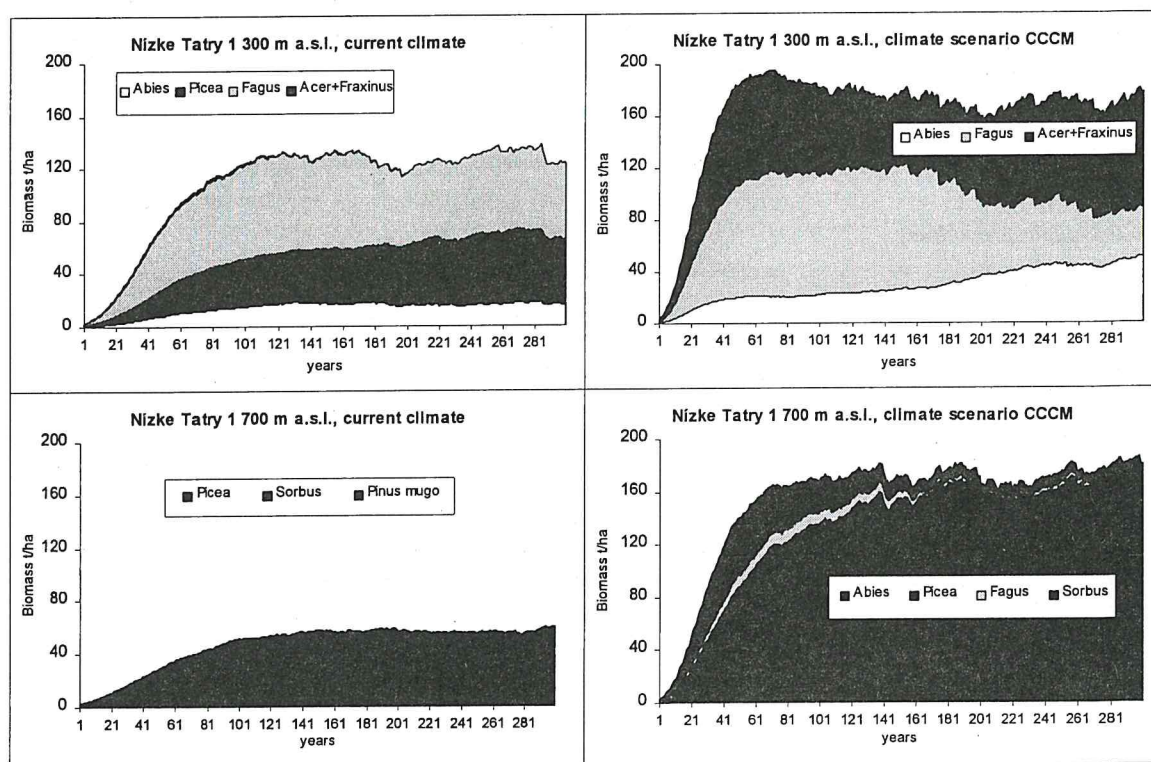
Na základe poznatkov získaných podobnými modelmi pre oblasť Nemecka a Švajčiarska (Alpský región, Solling) (KRAUCHI 1994) je potrebné upozorniť na dôležitú fázu "prechodu" z pomerov súčasnej klímy po rovnovážny stav v nových klimatických podmienkach. Táto fáza podľa výsledkov citovaného autora trvá 100 - 150 rokov, kedy môže dôjsť aj k výraznému zníženiu celkovej produkcie najmä u monodrevinových porastov

(smreková monokultúra Solling). Fázu prechodu môžeme datovať do obdobia po roku 2050 s tým, že prvé príznaky rozpadu bude možné identifikovať už v prvých desaťročiach 21. storočia. Z tohto hľadiska bude veľmi zaujímavý vývoj na hornej hranici lesa, ktorá na mnohých miestach nebola v posledných desaťročiach hospodársky ovplyvňovaná a kde sukcesné procesy vplyvom zmien klimatických podmienok by mohli byť prvými reálnymi identifikátormi týchto zmien (NICOLUSSI *et al.* 1995, NOBLE 1993).

Stupeň planárny a kolínny

Modelové výpočty sme realizovali pre podmienky súčasnej klímy ako aj pre očakávané klimatické podmienky podľa modelu CCCM pre lokalitu Sitno (500 m n.m., MINĐÁŠ *et al.* 1996). Z pohľadu výskytu a dynamiky vývoja lesných spoločenstiev s účasťou smreka môžeme výsledky modelu zhrnúť nasledovne:

- pri pôsobení uvažovaných faktorov a súčasnej klíme smrek nie je trvalou súčasťou lesných spoločenstiev v tomto stupni
- modelové výsledky pre podmienky scenárov klimatickej zmeny vylučujú akúkoľvek účasť smreka v lesných spoločenstvách tohto stupňa



Obr. 2 Výsledky Forest Gap modelu pre 2 lokality s rozdielnou nadmorskou výškou s výskytom smreka v oblasti Nízkych Tatier

Fig. 2 Forest Gap model results for the two altitudinal different sites with Norway spruce occurrence in Low Tatras region

Stupeň submontánny a montánny

Modelové výpočty sme realizovali pre podmienky súčasnej klímy ako aj pre očakávané klimatické podmienky podľa modelu CCCM pre lokalitu Dobročský prales (850 m n.m., MINĐÁŠ *et al.* 1996). Z pohľadu výskytu a dynamiky vývoja lesných spoločenstiev s účasťou smreka môžeme výsledky modelu zhrnúť nasledovne:

- pri pôsobení uvažovaných faktorov a súčasnej klíme smrek je súčasťou lesných spoločenstiev v tomto stupni avšak nenadobúda dominantné postavenie
- modelové výsledky pre podmienky scenárov klimatickej zmeny ukazujú, že smrek nebude súčasťou lesných spoločenstiev tohto stupňa, maximálne na jeho hornej hranici sa môže sporadicky vyskytovať

Oblasť supramontánna

Vzhľadom na význam smreka v tejto oblasti sme výpočty realizovali pre 2 lokality v oblasti výskytu súčasných horských smrekových lesov: Pilsko (1 250 m n.m., MINDÁŠ *et al.* 1996) a záver Vajskovskej doliny (1300 m n.m.) ako aj pre 1 lokalitu nad súčasnou hornou hranicou lesa (pásмо kosodreviny a ojedinelých smrekových zákrpkov) v závere Vajskovskej doliny (1 700 m n.m.). Z pohľadu výskytu a dynamiky vývoja lesných spoločenstiev s účasťou smreka môžeme výsledky modelu zhrnúť nasledovne:

- v podmienkach súčasnej klímy je zastúpenie smreka v lesných spoločenstvách tohto stupňa dominantné a na hornej hranici tohto stupňa vytvára hornú hranicu lesných spoločenstiev
- modelové výsledky pre podmienky scenárov klimatickej zmeny signalizujú posun hornej hranice lesa do oblasti súčasného subalpínskeho stupňa
- v supramontánnej oblasti sa zníži zastúpenie smreka na úkor výskytu buka a cenných listnáčov (javor horský, jaseň)

Na základe zhodnotenia modelových výpočtov Forest Gap Modelu môžeme konštatovať, že uvedený metodický postup v zásade vystihuje drevinové zloženie a produkčné schopnosti hlavných zonálnych lesných spoločenstiev Západných Karpát v podmienkach súčasnej klímy. Táto verifikácia nás oprávňuje považovať modelové zmeny podľa CCCM scenára (pre podmienky $2\times\text{CO}_2$) za relevantné.

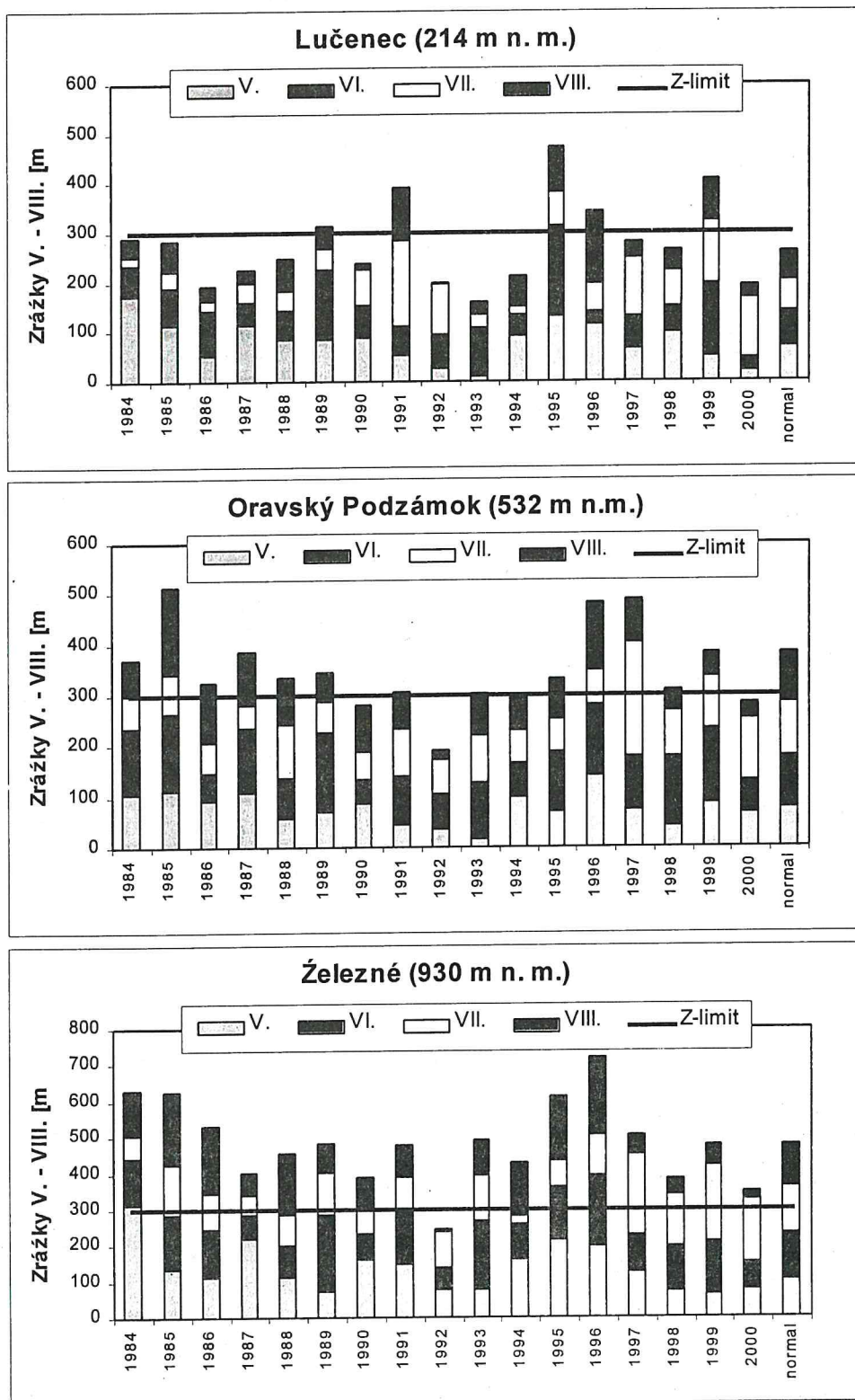
3.4 Analýza zrážkovej zabezpečenia

Stupeň planárny a kolínny

V sledovanom 16-ročnom období (1984 - 1999) sme v tomto stupni zistili vysoký deficit ročných úhrnov zrážok. Atmosféra v týchto miestach „dlhuje“ lesným porastom za sledovaných šesťnásť rokov takmer ročný až dvojročný úhrn zrážok. Vychádzajúc z hore uvedených skutočností, zamerali sme sa v našom vyhodnotení na zrážky v mesiacoch máj, jún, júl a august, v ktorých sa vytvára väčšina biomasy smreka. Z analýzy zrážok v týchto mesiacoch v jednotlivých rokoch je zrejme, že vo väčšine rokov sa v tejto oblasti nedosahujú úhrny zrážok potrebné pre optimálny rast smreka. V planárnom stupni uvedená skutočnosť vychádza aj z dlhodobého priemeru (normálu). V kolínnom stupni dlhodobé priemery v sledovaných mesiacoch hodnotu 300 mm síce dosahujú, ale posledné roky sú väčšinou hlboko pod touto hodnotou (obr. 3). Pestovanie smreka sa aj v tejto oblasti javí ako nevhodné vzhľadom na klesajúci trend úhrnov zrážok v posledných rokoch. Z fyziologického hľadiska sa veľmi nepriaznivo javia najmä júlové deficity, pričom treba pripomenúť, že mesiac júl je spravidla na väčšine staníc Slovenska považovaný za mesiac s maximom zrážok v rámci roka. Z tab. 8 je zrejme, že obdobie vrcholného leta má menej zrážok ako v minulosti. Nedostatok zrážok zapríčiňuje podľa TUŽINSKÉHO (1994, 1997) aj nárast deficitu pôdnej vlhky v týchto mesiacoch, najmä v porastoch nižších lesných vegetačných stupňov.

Stupeň submontánny a montánny

V tomto stupni v oblasti Nízkych Tatier, Oravy a Kysúc je aj napriek zníženiu úhrnov zrážok ešte zabezpečená limitná potreba zrážok pre smrek vo vegetačnom období. Dlhodobý priemer vysoko prevyšuje hodnotu ZL a väčšina konkrétnych letných úhrnov v jednotlivých rokoch taktiež túto hodnotu prevyšuje s výnimkou niektorých mimoriadne suchých rokov (1990, 1992, 1994, 1998 a 2000). Kritické z hľadiska zrážkového zabezpečenia sa javia najmä roky 1992 a 1994, kedy ani na jednej zo sledovaných staníc v tomto stupni letné úhrny nedosiahli požadované množstvo zrážok pre smrek (obr. 3). Hodnoty boli hlboko pod limitnou hodnotou ZL, čo sa mohlo prejaviť znížením prírastku smreka v danom roku aj vo vyšších polohách. Podľa TUŽINSKÉHO (1994, 1997) aj v porastoch tejto oblasti dochádza v niektorých mimoriadne suchých rokoch k deficitu pôdnej vlhky a zmene vodného režimu pôdy. Toto sa podľa neho prejavuje práve v smrekových porastoch (prekorenenie v povrchových vrstvách pôdy), kde sú stále častejšie vlhkostné pomery s obmedzenou, resp. nedostatočnou zásobou využiteľnej vody (letné mesiace 1990, 1992, 1993).



Obr. 3: Úhrny zrážok v mesiacoch máj, jún, júl a august v porovnaní so zrážkovou limitnou hodnotou 300 mm pre prirodzený výskyt smreka v rôznych oblastiach Slovenska
Fig. 3: Precipitation totals in May, June, July and August in comparison to the precipitation limit value 300 mm for natural occurrence of spruce in different sites of Slovakia

Oblasť supramontánna

Z hľadiska zrážkového zabezpečenia smreka je to stupeň s dostatočným množstvom zrážok počas celého roka. Výnimočne, v mimoriadne suchých rokoch (1992 a 1994), zrážkový úhrn v sledovaných mesiacoch nedosahuje limitnú hodnotu (obr. 3). Pri intenzívnej transpirácii môže byť i v takýchto polohách nedostatočná zásoba fyziologicky prístupnej vody v povrchových vrstvách pôdy. Limitujúcim faktorom z bioklimatologického hľadiska sa v týchto polohách stávajú teplotné pomery.

Tab. 8 Sumy odchýlok úhrnov zrážok od dlhodobých mesačných a ročných priemerov v rokoch 1984 – 1999
Table 8 Totals of precipitation deviations from annual and monthly longtime averages in the last decade (1984 – 1999)

Meteorologická stanica	Nadmorská výška [m]	Dlhodobý priemer 1951-80 [mm]	Sumy odchýlok za 16 rokov [mm] mesiac				
			V	VI	VII	VIII	Rok
DUDINCE	140	674	+86	-19	-162	-192	-1143
LUČENEC	214	635	+220	+162	+10	-93	-1084
SLIAČ	313	703	+182	-161	-305	-35	-417
ČADCA	420	915	+131	+71	-550	-226	-84
OR. PODZÁMOK	532	798	+8	+119	-418	-264	-206
LIPT. OSADA	605	1048	+231	-218	-490	-31	-1195
ORAV. LESNÁ	780	1087	+123	+18	-556	-53	-71
TELGART	901	893	+375	-171	-484	-142	-633

4. Zhrnutie výsledkov

Uvedené modelové výsledky umožňujú určité zovšeobecnenie týchto výsledkov vo vzťahu k perspektívam výskytu a ďalšieho pestovania smreka v oblasti západných Karpát z pohľadu prognózovaných klimatických zmien. Sumarizované výsledky sú prezentované v tab. 9.

Tab. 9 Sumárne výsledky hodnotenia výskytu a ďalšieho pestovania smreka v oblasti Západných Karpát z hľadiska predikcie klimatických zmien

Table 9 Summarized results of occurrence prospectives and further cultivation of spruce in the region of the west Carpathians from the viewpoint of the climate change predictions.

Spoločenstvá smreka (SM)	Holdridge model	Forest Gap Model	Analýza Bioklimatických areálov	Analýza zrážkovej zabezpečivosti
Planárny a kolínny stupeň	• absencia podmienok pre výskyt SM	• zánik spoločenstiev smreka	• zánik podmienok pre výskyt smreka	• limitujúci deficit zrážok pre smrek
submontánny a montánny stupeň	• podmienky pre pokles zastúpenia SM	• zánik prípadne okrajový výskyt SM	• všeobecný ústup ihličnanov (SM)	• dostatok zrážok pre SM len na severe oblasti
supramontánny stupeň	• podmienky pre rozvoj zmiešaných spoločenstiev SM, posun hornej hranice lesa	• rozvoj zmiešaných SM-JD-BK porastov, posun hornej hranice lesa	• zníženie zastúpenia SM, plošná redukcia, posun hornej hranice lesa	• dostatok zrážok pre existenciu SM

5. Literatúra

1. AMBROS, Z., 1971: Vplyv klimatických pomerov na produkciu hlavných drevín na Slovensku. *Lesnícky časopis*, 17(1), 19-29.
2. BLATTNÝ, T., ŠTASTNÝ, T., 1959: Prirodzené rozšírenie lesných drevín na Slovensku. *SVPL*, Bratislava, 57-79.
3. BOTKIN, D.B.-JANAK, J.F.-WALLIS, J.R., 1972: Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *JOURNAL OF ECOLOGY*, 60, 849-873.
4. FISCHLIN, A., BUGMANN, H., GYALISTRAS, D., 1995: Sensitivity of a forest ecosystem model to climate parametrization schemes. *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 87 (1995), 267-282.
5. HLADÍK, M. 1996: Prírodné podmienky hospodárenia, súčasná štruktúra lesného fondu. In: *Klimatické zmeny a lesy Slovenska*, NKP SR, 5/96, Bratislava, 1996, 12-19.
6. HOLDRIDGE, 1967: Life zone ecology. *TROPICAL SCIENCE CENTRE SAN JOSE*.
7. KOLEKTÍV, 1985-2000: Ročenky atmosférických zrážok na území SR v rokoch 1984 - 2000. *SHMÚ*, Bratislava.
8. KORPEL, Š., 1989: *Pralesy Slovenska*. Veda, SAV, Bratislava, 332 s.
9. KRAUCH, 1994: Modelling Forest Succession as Influenced by a Changing Environments. *Mit. Eidgenoss. Forsch. für Wald, Schnee und Landschaft*, 69, 2, 145-271.
10. KREČMER, *et al.*, 1980: Bioklimatologický slovník terminologický a explikativní. *Academia*, Praha, 244 s.
11. LAPIN, M. - NIEPOVÁ, E. - FAŠKO, P. 1995: Regionálne scenáre zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku. *Národný klimatický program*, 3, 19-57.
12. LAPIN, M. 1996: Scenáre klimatickej zmeny na Slovensku. In: *"Lesné ekosystémy a globálne klimatické zmeny"*, LVÚ Zvolen, 7-15.
13. LENIHAN, J. M., NEILSON, R. P., 1993: A rule-based vegetation formation model for Canada. *Journal of Biogeography* (1993), 20, 615-628.
14. MATYAS, C., 1995: Modeling climate change effects with provenance data. *Tree PHYSIOLOGY*, 14, 1994, 797-804.
15. MINĐÁŠ, J., 1992: Klimatická charakteristika vertikálneho rozšírenia lesných drevín na Slovensku. In: *Vybrané problémy aplikovanej klimatológie*. *SHMÚ, Práce a štúdie* 44, Bratislava 1992, 66-72.
16. MINĐÁŠ, J., 1993: Klimatické aspekty rozšírenia smrek a buka na Slovensku. In: *Lesníctvo a výskum v meniacich sa ekologických a ekonomických podmienkach v Slovenskej republike*. Zborník z jubilejnej konferencie, Lesnícky výskumný ústav, Zvolen 1993, 192-197.
17. MINĐÁŠ, J., ŠKVARENINA, J., 1994: Predpokladané dôsledky klimatických zmien na lesné ekosystémy. *Národný klimatický program*, Bratislava, NKP 1, 55-82.
18. MINĐÁŠ, J.-LAPIN, M.-ŠKVARENINA, J., 1996: Klimatické zmeny a lesy Slovenska. *NKP SR*, 5/96, Bratislava 1996, 98 s.
19. MINĐÁŠ, J., 1997: Možné dopady klimatickej zmeny na lesy Slovenska a zhodnotenie ich rizikovosti. *Strategická štúdia*. LVÚ Zvolen, február 1997, 40 s.
20. MINĐÁŠ, J., 1998: Vertikálne klimatické areály lesných drevín západných Karpát. *Acta Instituti Forestale ZVOLEN*, TOMUS 9, LVÚ Zvolen, 1998.
21. MRÁČEK, Z., PAŘEZ, J., 1986: *Pěstování smrku*. *SZN*, Praha, 203 s.
22. NEBE, W., RZEZNIK, Z. 1967: Über das Höhenwachstum und den Ernährungszustand von Fichtenbeständen auf grundwasserfreien Standorten Nordostpolens. *Archiv f. Forstwesen*, Bd. 16(6/9), 641-646.
23. NEILSON, R. P., 1993: Transient ecotone response to climatic change: some conceptual and modelling approaches. *Ecological Applications*, 3 (3), 1993, 385-395.
24. NICOLUSSI, K., BORTENSCHLAGER, S., KORNER, Ch., 1995: Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO₂-related. *Trees* (1995), 9, 181-189.
25. NOBLE, I. R., 1993: A model of the responses of ecotones to climate change. *Ecological Applications*, Vol.3, No.3, 1993, 396-403.
26. PAGAN, J., 1992: *Lesnícka dendrológia*. *ES TU*, Zvolen, 10-43.
27. SCHMIDT-VOGT, H., 1977: *Die Fichte*. Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin, 647s.
28. SCHLAEPFER, R., (ed.): Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. Progress report of the IUFRO Task Force "Forest Climate Change and Air Pollution". Vienna, IUFRO, Birmensdorf, WSL. IUFRO Series 4, 132 pp.
29. SHUGART, 1984: *A Theory of Forest Dynamics*. Springer-Verlag New York, 278 pp.
30. U.S. Country Study, 1994: U.S. Country Studies Program, 1994: Guidance for Vulnerability and Adaptation Assessment. Washington, F1-F38.
31. STŘELCOVÁ, K., MINĐÁŠ, J., 1997: Transpirácia drevín v jarnom období na lokalite Poľana - Hukavský Grúň. In: *Racionálne využívanie a obhospodarovanie Chránenej krajiny oblasti - Biosférickej rezervácie Poľana*, ed. Midriak, R., Technická Univerzita Zvolen, 1997: 77-82.
32. ŠINDELÁR, 1993: Predpokladaný vývoj klimatických poměrů ve střední Evropě a reakce dílčích populací některých druhů lesních dřevin na změny prostředí. *Lesnictví-Forestry*, 39, 1993 (11), 433-444.
33. TUŽINSKÝ, L., 1994: Vplyv počasia na zdravotný stav lesov. In: *Výskyt škodlivých činiteľov v lesoch Slovenska za rok 1993 a prognóza ich vývoja na rok 1994*. LVÚ, Zvolen, 1-4.
34. TUŽINSKÝ, L., 1997: Vodný režim pôdy a chemické zloženie vody v smrekovom ekosystéme. In: *Vliv imisí na lesy a lesní hospodářství* Beskyd 9, MZLU Brno, 39-44.

35. TOMLAIN, 1999: Dôsledky klimatickej zmeny na evapotranspiráciu z lesnej cenózy na vybraných staniciach stredného Slovenska. In: Atmosféra 21. storočia, organizmy a ekosystémy. Zborník referátov z medzinárodnej vedeckej konferencie, Zvolen 7.-9. septembra 1999, Technická univerzita vo Zvolene.
36. VINŠ et al., 1996: Dopady možné změny klimatu na lesy v České republice. Národní klimatický program ČR, 19, Praha 1996, 135 s.

EXPECTED CLIMATIC CHANGES AND POSSIBLE IMPACTS ON NORWAY SPRUCE (*PICEA ABIES* L. KARST.) IN SLOVAKIA

Jozef Mind'áš¹, Jaroslav Škvarenina², Katarína Střelcová², Tibor Priwitzer¹

¹Forest Research Institute, Zvolen, ²Forestry Faculty, Technical University at Zvolen

SUMMARY

In presented paper we tried to evaluate and predict the influence of the expected climatic changes on bioclimatic conditions of spruce occurrence in the west Carpathians according to objective criteria and four different methodological approaches. For determination of the climate change impacts on patterns of land cover with spruce was used the climate-vegetation classification model (Holdridge life zone classification model). For prediction of changes in composition and productivity of spruce stands in response to a climate change was used the FOREST GAP model. Besides this we made a direct analysis of relevant bioclimatic variables and estimated precipitation sufficiency of Norway spruce. By comparing different methods we tried to obtain reliable results of the influence of climatic changes on the present and future occurrence of spruce and its future cultivation in the west Carpathians.

The above presented four methodological approaches of the expected climate change impacts on Norway spruce occurrence have brought very similar results:

- spruce occurrence potential and its secure cultivation in Slovakia will decline substantially
- in the altitudes up to 500 m above sea level, it will be necessary to eliminate Norway spruce from the target tree species composition
- in the altitudes ranging from 500 m to 1000 m above sea level, it will be necessary to support the diversity of the existing Norway spruce stands, i.e. to secure more diverse tree species composition. e.g. beech-fir spruce stands
- in the altitudes above 1000 m above sea level, the bioclimatic conditions for Norway spruce should not be dramatically changed. However, we are not able to predetermine the future risks precisely, e.g. biotic noxious agents, mainly insects. The abiotic noxious agents as well as air pollutants (ozone, acid deposition, etc.) will affect the spruce stands. The changes on the upper tree limit are still the problem to be solved.

Spruce communities (SM)	Holdridge model	Forest Gap Model	Analysis of bioclimatic zones	Analysis of precipitation provision
PLANAR AND COLINE ZONE	• absence of conditions for the occurrence	• extinction of spruce communities	• cessation of conditions for spruce occurrence	• limiting precipitation deficit
SUBMONTANE AND MONTANE ZONE	• conditions for decreased occurrence	• extinction or marginal occurrence of spruce	• general decline of conifers (SM)	• sufficient precipitation amount only in the north of the zone
SUPRAMONTANE ZONE	• conditions for development of mixed spruce communities	• development of mixed spruce-fir-beech stands	• decreased spruce occurrence, areal reduction	• sufficient precipitation amount for spruce occurrence

TENDENCIE A TRENDY VO VEGETAČNOM OBDOBÍ VINIČA HROZNODORÉHO V LOKALITE DOLNÉ PLACHTINCE V ROKOCH 1971 - 2000

Olga Braslavská, Slovenský hydrometeorologický ústav, regionálne stredisko, Banská Bystrica

ÚVOD

Pestovanie viniča hroznorodého má v južných oblastiach Slovenska dlhodobú tradíciu. Tento rastlinný druh s mohutnou koreňovou sústavou dobre využíva zásoby dostupnej pôdnej vody a v našich podmienkach spravidla netrpí počas vegetačného obdobia jej nedostatkom. Oblasti pestovania tejto kultúrnej plodiny sú vymedzené predovšetkým jej nárokmi na teplo a svetlo, pretože je to druh teplomilný a svetlomilný. Veľmi citlivo reaguje na priebeh počasia nielen vo vegetačnom období ale aj v období vegetačného pokoja. Tieto jeho danosti ho predurčujú na využitie v monitorovaní vplyvu klimatickej zmeny – predovšetkým zmien a zvyšovania teploty vzduchu – na biotické faktory životného prostredia.

MATERIÁL A METODIKA

Fenologické pozorovanie viniča hroznorodého prebiehalo na skúšobnej stanici Ústredného kontrolného a skúšobného ústavu poľnohospodárskeho (ÚKSÚP) v Dolných Plachtinciach (228 m n.m., z.š. 48°12' a z.d. 19°18') od roku 1971 do roku 1989 podľa platnej metodiky ÚKSÚP-u a od roku 1989 do roku 2000 aj podľa metodiky Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). Pozorovanie bude pokračovať aj v ďalšom období.

Na vyhodnotenie sme použili fenologické údaje zaznamenané na troch odrodách viniča hroznorodého - Rízling vlašský (RV), Müller- Thurgau (M-T) a Burgundské biele (BB). Vyhodnotili sme len tie fenologické fázy, ktoré boli podľa obidvoch metodík pozorované rovnako a zároveň pokryli aj celé vegetačné obdobie viniča hroznorodého:

- Pučanie púčikov (PP) – na konci púčikov na plodných letorastoch sa objavili zelené špičky listov
- Prvé listy (PL) – prvé listy sa úplne rozvinuli, ale nedosahujú ešte veľkosť dospelých listov
- Začiatok kvitnutia (ZK) – prvé kvety v spodnej časti metliny rozkvitnuté
- Mäknutie bobúľ (MB) – v horných, lepšie osvetlených častiach kra začali bobule mäknúť
- Zber (ZB) - začiatok zberu plodov

Okrem toho sme vyhodnotili aj trvanie medzifázových intervalov:

- Pučanie púčikov – prvé listy (PP – PL)
- Pučanie púčikov – začiatok kvitnutia (PP – ZK)
- Prvé listy – začiatok kvitnutia (PL – ZK)
- Začiatok kvitnutia – mäknutie bobúľ (ZK – MB)
- Začiatok kvitnutia – zber (ZK – ZB)
- Mäknutie bobúľ – zber (MB – ZB)
- Pučanie púčikov – zber (PP – ZB)

Pre každú odrodu sme vypočítali priemerné dátumy nástupu fenologických fáz a priemerné trvanie medzifázových intervalov. Okrem toho sme pre každú fenologickú fázu vypočítali priemerný dátum jej nástupu a pre každý medzifázový interval jeho priemerné trvanie v dňoch za hodnotené obdobie.

Meteorologické údaje na výpočet teplotných charakteristík jednotlivých vegetačných období (apríl až september) sú z meteorologickej stanice SHMÚ umiestnenej priamo v areáli skúšobnej stanice ÚKSÚP-u v Dolných Plachtinciach. Teplotný prah pre začiatok vegetačného obdobia viniča hroznorodého predstavuje teplota vzduchu 10 °C. Pre jednotlivé vegetačné obdobia rokov 1971 až 2000 sme preto vypočítali sumu priemerných denných teplôt vzduchu (T_d) s hodnotou ≥ 10 °C. Okrem toho sme určili počet letných dní ($T_{\max} \geq 25$ °C) a počet tropických dní ($T_{\max} \geq 30$ °C) vo vegetačnom období. Za druhú polovicu obdobia vegetačného pokoja (január až marec) sme stanovili počet dní s $T_{\min} < 0$ °C. Vypočítali sme aj trvanie slnečného svitu v hodinách za apríl až september. Tento meteorologický prvok hrá významnú úlohu pri fotosyntetickej aktivite rastlín.

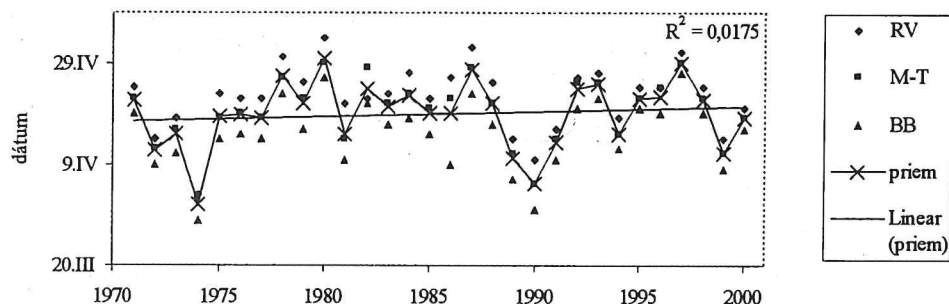
Aby sme zistili štatisticky preukazné trendy vo vývine viniča hroznorodého, urobili sme trendovú analýzu (určenie hladiny významnosti lineárneho trendu - P) nástupu fenologických fáz a trvania medzifázových intervalov aj vybraných teplotných charakteristík a trvania slnečného svitu (softvérové vybavenie Excel).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

1. Fenologické fázy (Tab. 1)

1.1 Pučanie púčikov – PP (Obr.1)

Priemerný dátum nástupu pučania púčikov bol 20.4. a pre jednotlivé odrody v poradí BB 16.4., M-T 20.4. a RV 23.4. Najskorší dátum nástupu tejto fenologickej fázy na všetkých troch odrodách bol zaznamenaný v roku 1974 a najneskorší v rokoch 1980 (RV, M-T) a 1997 (M-T, BB). Nástup fenologickej fázy sa mierne posúval do neskoršieho obdobia, ale bol bez štatisticky preukazného lineárneho trendu. V hodnotenom tridsaťročnom období to predstavuje približne o tri dni neskorší nástup pučania púčikov, teda na konci druhej aprílovej dekády.

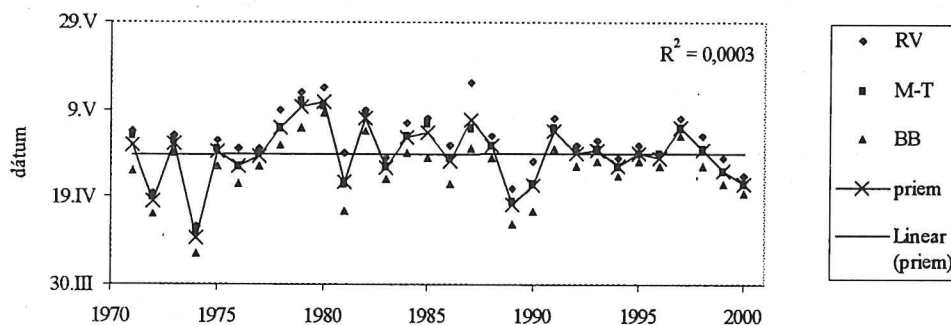


Obr. 1 Pučanie púčikov viniča hroznorodého [obdobie 1971-2000]

Fig. 1 Budburst of the grapevine [period 1971-2000]

1.2 Prvé listy – PL (Obr.2)

Priemerný dátum rozvíjania sa prvých listov (začiatok zalisťovania) bol 30.4. a na daných odrodách opäť v tom istom poradí ako pučanie púčikov BB 26.4., M-T 30.4. a RV 3.5. Najskorší dátum bol zaznamenaný tiež na všetkých troch odrodách v roku 1974 a najneskorší v rokoch 1979 (M-T) 1980 (BB) a 1987 (RV). Nástup fenologickej fázy sa za posledné desaťročie obdobia 1971 – 2000 menil len málo. Pri nástupe tejto fenologickej fázy tiež nebol zistený štatisticky preukazný trend a za hodnotené obdobie sa jej nástup posunul len o jeden deň neskôr.

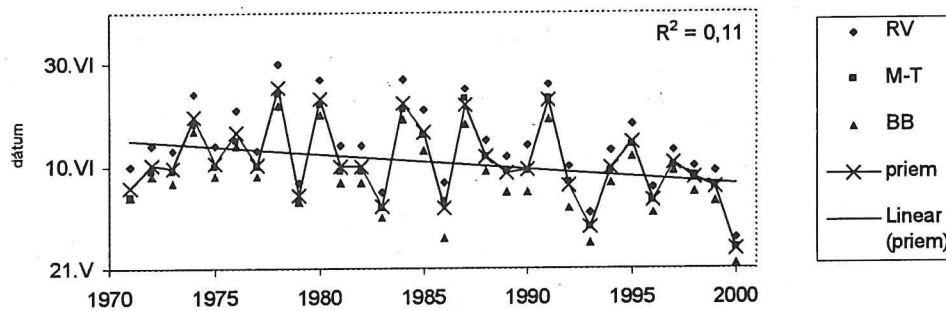


Obr. 2 Prvé listy viniča hroznorodého [obdobie 1971-2000]

Fig. 2 First leaves of the grapevine [period 1971-2000]

1.3 Začiatok kvitnutia – ZK (Obr.3)

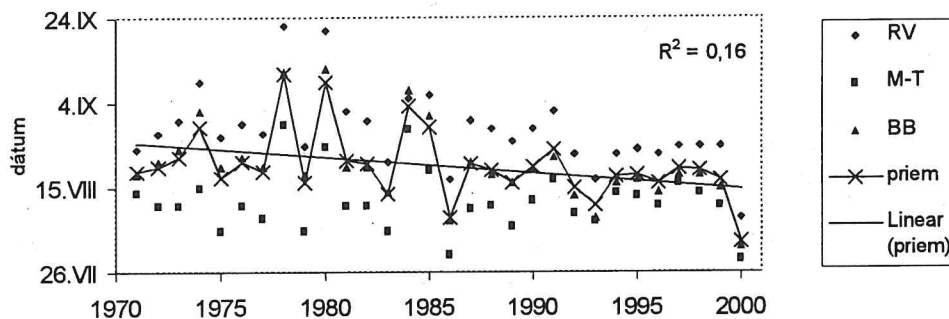
Priemerný dátum začiatku kvitnutia bol 12.6. Zachovalo sa doterajšie poradie vo vývine odrôd, priemerný dátum začiatku kvitnutia bol pri BB 9.6., pri M-T 11.6. a pri RV 15.6. Na všetkých troch odrodách bol najskorší dátum začiatku kvitnutia v roku 2000 a najneskorší v roku 1978. Táto fenologická fáza vykazovala posun do skoršieho obdobia a pri odrodách RV a BB aj pri priemernej hodnote bol zaznamenaný štatisticky málo preukazný klesajúci lineárny trend ($P > 0,1$). Za tridsať rokov sa začiatok kvitnutia posunul približne o 9 dní skôr, teda z polovice druhej júnovej dekády do polovice prvej júnovej dekády.



Obr. 3 Začiatok kvitnutia viniča hroznorodého [obdobie 1971-2000]
Fig. 3 Beginning of flowering of the grapevine [period 1971-2000]

1.4 Mäknutie bobúľ – MB (Ob.4)

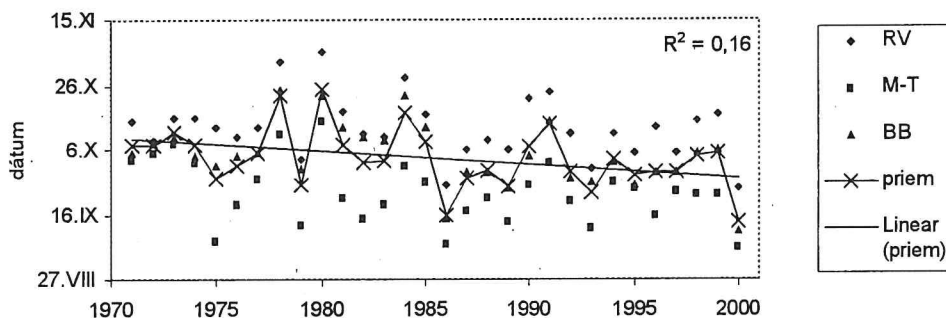
Priemerný dátum mäknutia bobúľ bol 22.8. a zmenilo sa poradie prvých dvoch odrôd v rýchlosti vývinu. Priemerný najskorší dátum nástupu tejto fázy bol na odrode M-T 13.8., potom na BB 21.8. a nakoniec na RV 29.8. Najskorší dátum sa vyskytol v roku 2000 a najneskorší v rokoch 1978 (RV, M-T) a 1980 (BB). Nástup fenologickej fázy sa posúval do skoršieho obdobia opäť pri odrodách RV a BB so štatisticky preukazným klesajúcim lineárnym trendom ($P > 0,01$) a v priemernej hodnote, vypočítanej zo všetkých odrôd tiež s klesajúcim lineárnym trendom ($P > 0,05$). Za roky 1971 až 2000 to bolo urýchlenie nástupu tejto fenologickej fázy takmer o 11 dní, teda posun z poslednej pentády do polovice augusta.



Obr. 4 Mäknutie bobúľ viniča hroznorodého [obdobie 1971-2000]
Fig. 4 Veraison of the grapevine [period 1971-2000]

1.5 Zber – ZB (Obr.5)

Podobne ako predošlé dve fázy aj zber hrozna nastupoval v skoršom období. Priemerný dátum zberu bol 4.10., pri M-T 24.9., pri BB 5.10. a pri RV 14.10. Najskôr zber začal v roku 2000 a najneskôr v rokoch 1978 (BB) a 1980 (RV, M-T). Štatisticky preukazný klesajúci lineárny trend ($P > 0,05$) v dátume začiatku zberu bol pri odrodách M-T a BB a aj v priemernej hodnote, vypočítanej zo všetkých troch odrôd. Urýchlenie začiatku zberu dosiahlo 12 dní, posunulo sa za obdobie 1971 – 2000 zo začiatku druhej pentády októbra do polovice tretej septembrovej dekády.



Obr. 5 Zber viniča hroznorodého [obdobie 1971-2000]
Fig. 5 Harvest of the grapevine [period 1971-2000]

Záverom možno konštatovať, že prvé dve hodnotené fenologické fázy - pučanie púčikov a prvé listy, ktoré sú spojené so začiatkom vegetačných aktivít viniča hroznorodého mali tendenciu nastupovať neskoršie, ale bez štatisticky signifikantného trendu.

Ostatné fenologické fázy - začiatok kvitnutia, mäknutie bobúľ a zber naopak nastupovali skôr a v jednotlivých etapách vývinu viniča hroznorodého od začiatku kvitnutia do plnej zrelosti sa objavoval štatisticky signifikantný posun do skoršieho obdobia.

Od fenologickej fázy začiatok kvitnutia do zberu bola zistená priama závislosť medzi dátumami ich nástupu v jednotlivých ročníkoch. Tieto fenologické fázy nastupovali v teplotne dostatočne zabezpečenej časti vegetačného obdobia a tak čím skôr nastúpila fáza začiatok kvitnutia, tým skôr nastúpila fáza mäknutie bobúľ (koeficient korelácie 0,877) a zber (0,727). Takáto závislosť medzi fenologickými fázami bola zistená aj v iných pestovateľských oblastiach [4].

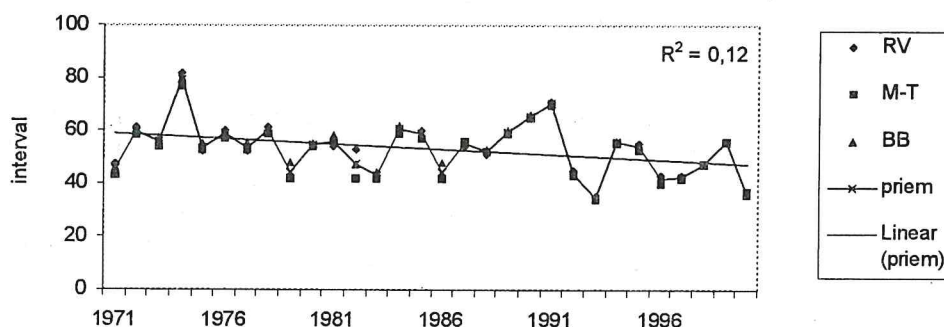
2. Medzifázové intervaly (Tab.2)

2.1 Pučanie púčikov – prvé listy

Priemerné trvanie intervalu pri odrôdách RV a BB bolo 10 dní, pri odrode M-T 9 dní a priemerné trvanie na lokalite 10 dní. Najkratšie tento interval trval v roku 2000, len 4 dni a najdlhšie v roku 1991, až 21 dní (RV, M-T), pri odrode BB 20 dní. Posledné desaťročie hodnoteného obdobia sa vyznačovalo okrem roku 1999 menšou medziročnou variabilitou v jeho trvaní a aj menšou variabilitou trvania intervalu medzi danými odrodami. Interval mal tendenciu skracovať sa, a to približne o dva dni za obdobie 1971 – 2000.

2.2 Pučanie púčikov – začiatok kvitnutia (Obr.6)

Priemerné trvanie intervalu bolo 52 dní pri M-T, 53 dní pri RV a 54 dní pri BB a priemerné trvanie na lokalite 53 dní. Najkratšie trval tento interval v roku 1993 a najdlhšie v roku 1974. Medzifázový interval sa skracoval, štatisticky málo preukazný klesajúci lineárny trend bol zistený pri odrode Rízling vlašský ($P > 0,1$) a pri priemernej hodnote vypočítanej zo všetkých troch odrôd ($P > 0,1$) a štatisticky preukazný klesajúci lineárny trend bol pri odrode Burgundské biele ($P > 0,05$). Za tridsať rokov sa tento interval skrátil približne o 12 dní. Variabilita v rámci ročníka medzi trvaním intervalu pri jednotlivých odrodách bola veľmi malá.



Obr. 6 Medzifázový interval pučanie púčikov – začiatok kvitnutia [obdobie 1971-2000]

Fig. 6 Interphase interval budburst – beginning of flowering [period 1971-2000]

2.3 Prvé listy – začiatok kvitnutia

Priemerná hodnota trvania intervalu pri odrode M-T bola 42 dní, BB 43 a RV 44 dní a na lokalite 43 dní. Najkratšie trval tento interval v roku 1979 a najdlhšie, tak ako pri predošlom medzifázovom intervale v roku 1974. Interval mal opäť tendenciu skracovať sa. Štatisticky málo preukazný klesajúci lineárny trend bol zistený pri RV ($P > 0,1$) a pri priemernej hodnote ($P > 0,1$), pri BB bol štatisticky preukazný klesajúci lineárny trend ($P > 0,05$). Za obdobie 1971 – 2000 sa interval skrátil približne o 10 dní.

2.4 Začiatok kvitnutia – mäknutie bobúľ

Tento interval trval v priemere pri odrode M-T 62 dní, pri BB 73 dní, pri RV 75 dní a priemerná hodnota na lokalite bola 70 dní. Jeho trvanie bolo najkratšie v roku 1987 a najdlhšie v rokoch 1980 (RV, BB), 1988 (M-T). Tendencia skracovania obdobia trvania intervalu bola síce opäť zaznamenaná, ale štatisticky preukazný klesajúci lineárny trend bol len pri odrode BB ($P > 0,05$). Za tridsať rokov sa medzifázový interval začiatok kvitnutia – mäknutie bobúľ odrody BB skrátil o 6 dní.

2.5 Začiatok kvitnutia – zber

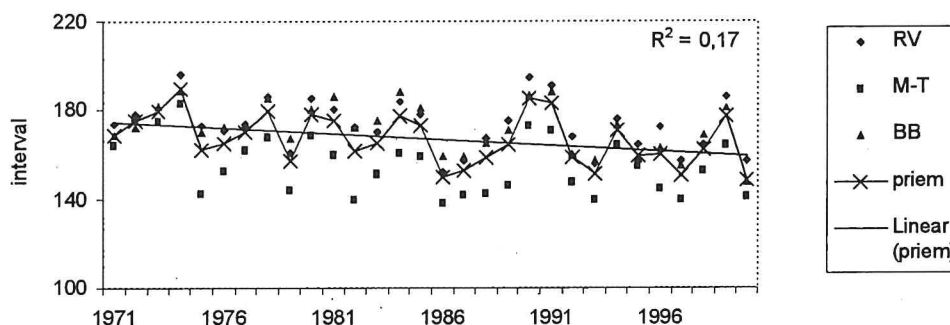
V priemere tento interval trval 105 dní pri M-T, 119 dní pri BB a 121 dní pri RV a priemerná hodnota na lokalite bola 115 dní. Najkratšie trval interval v roku 1987 a najdlhšie v roku 1971 (RV, M-T), 1973 (M-T) 1983 (BB). Hoci aj tu sa vyskytla tendencia skracovania sa intervalu, ani pri jednej odrode nebol zistený štatisticky preukazný klesajúci lineárny trend. Priemerný interval, vypočítaný z troch odrôd, sa za obdobie 1971 – 2000 skrátil približne o 3 dni.

2.6 Mäknutie bobúľ – zber

Priemerné trvanie intervalu bolo v poradí M-T 42 dní, BB 45 dní a RV 46 dní a priemerná hodnota na lokalite bola 44 dní. Najkratšie trvanie bolo zaznamenané v rokoch 1974 (BB), 1984 (M-T) a 1987 (RV) a najdlhšie v rokoch 1973 (M-T), 1978 (RV) a 1983 (BB). Tendencia skracovania pretrvávala aj pri tomto intervale, štatisticky preukazný klesajúci lineárny trend bol však zaznamenaný len pri odrode M-T ($P > 0,01$), čo predstavovalo za tridsať rokov skrátenie o 9 dní.

2.7 Pučanie púčikov – zber (Obr. 7)

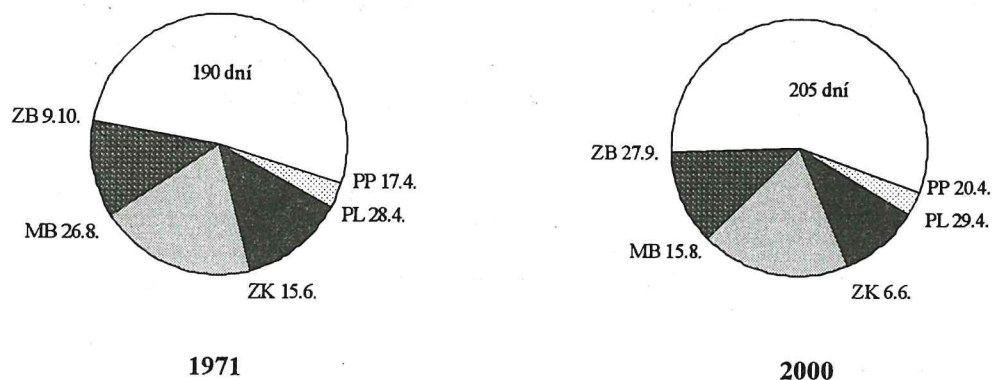
Tento interval môže vyjadrovať vegetačné obdobie viniča hroznorodého, ktoré v priemere trvalo 167 dní, pri M-T 156 dní, pri BB 172 dní a pri RV 173 dní. Najkratšie trval interval pučanie púčikov – plná zrelosť v rokoch 1986 (RV, M-T) a 2000 (BB) a najdlhšie v roku 1974. Trvanie medzifázového intervalu odrôd M-T a BB ako aj priemernej hodnoty vypočítanej za všetky tri odrody malo výraznejší klesajúci lineárny trend ($P > 0,05$) ako trvanie intervalu pri odrode RV ($P > 0,1$). V priemernej hodnote sa interval skrátil približne o 15 dní, pri RV sa skrátil takmer o 13 dní, pri BB o 16 dní a pri M-T o 18 dní.



Obr. 7 Medzifázový interval pučanie púčikov – zber [obdobie 1971-2000]

Fig. 7 Interphase interval budburst – harvest [period 1971-2000]

Najvýznamnejší trend sa vyskytol v trvaní medzifázového intervalu pučanie púčikov – zber a poukazoval na skracovanie vegetačného obdobia viniča hroznorodého za posledné tridsaťročie v priemere najmenej o dva týždne. Mierny posun pučania púčikov do neskoršieho obdobia bez preukazného trendu a na druhej strane skorší začiatok zberu so štatisticky preukazným trendom mali za následok, že sa tento medzifázový interval skrátil. V období 1971 – 2000 došlo k urýchleniu vývinu viniča hroznorodého v medzifázovom intervale pučanie púčikov – začiatok kvitnutia a menej výrazne sa skracovali aj ďalšie medzifázové intervaly. Medzifázový interval ZB – PP sa predlžil zo 190 na 205 dní a vegetačné obdobie sa skrátilo zo 175 na 160 dní, čo v jednotlivých etapách vývinu predstavovalo takéto skrátenie (Obr. 8): medzifázový interval PP – PL trval na začiatku hodnoteného obdobia 11 a na konci 9 dní medzifázový interval PL – ZK trval na začiatku hodnoteného obdobia 48 a na konci 38 dní medzifázový interval ZK – MB trval na začiatku hodnoteného obdobia 72 a na konci 70 dní medzifázový interval MB – ZB trval na začiatku hodnoteného obdobia 44 a na konci 42 dní.



Obr. 8 Posun nástupu fenologických fáz a zmena v trvaní vegetačného obdobia viniča hroznorodého [obdobie 1971-2000]

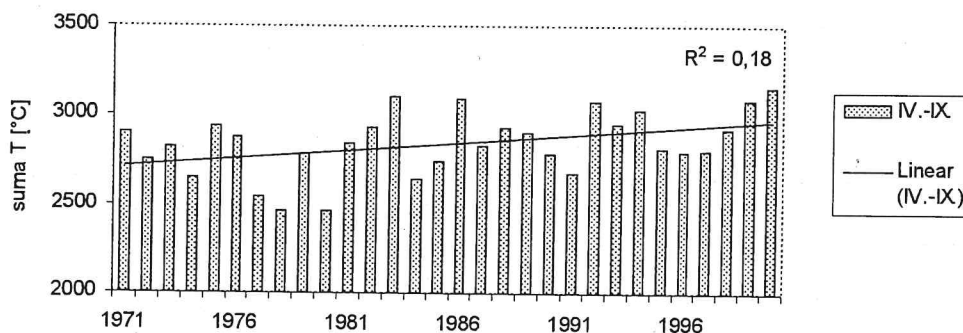
Fig. 8 Shift of the onset of phenological phases and the change in the vegetation season duration of the grapevine [period 1971-2000]

3. Vybrané teplotné charakteristiky vegetačného obdobia viniča hroznorodého v rokoch 1971 – 2000

Ukazovateľ teplotnej zabezpečenia viniča hroznorodého v hlavnom vegetačnom období apríl až september - suma priemerných denných teplôt vzduchu s hodnotou ≥ 10 °C mala štatisticky preukazný stúpajúci lineárny trend ($P > 0,05$). Za hodnotené obdobie vzrástla približne o 270 °C (Obr. 9).

Počty letných aj tropických dní vo vegetačnom období vykazovali tak isto štatisticky preukazný stúpajúci lineárny trend ($P > 0,01$). Ich počet sa zvyšoval hlavne od začiatku osemdesiatych rokov. Počet letných dní neklesal počas posledných dvadsať rokov pod 50 a za obdobie 1971 – 2000 sa zvýšil približne o 24. Počet tropických dní sa zvýšil o 14 a v deviatich rokoch z obdobia 1981 - 2000 bolo zaznamenaných 20 a viac tropických dní (Obr. 10).

Trvanie slnečného svitu v hodinách za apríl až september malo tiež štatisticky preukazný stúpajúci lineárny trend ($P > 0,05$) a zvýšilo sa za daných tridsať rokov približne o 130 hodín (Obr. 11). Trvanie slnečného svitu v roku 2000 už na konci augusta dosiahlo 1440 hodín, čo bola hodnota presahujúca trvanie slnečného svitu za apríl až september vo všetkých rokoch hodnoteného obdobia okrem rokov 1992, 1993 a 1997, kedy bola len o málo vyššia. V každom mesiaci vegetačného obdobia okrem septembra mesačná hodnota trvania slnečného svitu mierne stúpala, ale na úrovni jednotlivých mesiacov nebol zaznamenaný preukazný lineárny trend.



Obr. 9 Sumy $T_d \geq 10$ °C za apríl až september [obdobie 1971-2000]

Fig. 9 Sums of $T_d \geq 10$ °C from April to September [period 1971-2000]

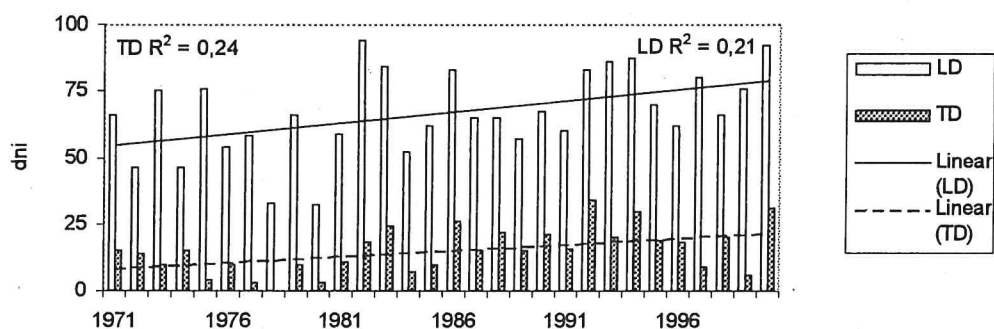
Tab. 1 Priemerný, prvý a posledný dátum nástupu fenologických fáz viniča hroznorodého, obdobie 1971 - 2000

Odr. Var.	Fenologická fáza - Phenological phase														
	puč. púčikov (PP) budburst			prvé listy (PL) first leaves			zač. kvitnutia (ZK) beginning of flower.			mäk. bobulí (MB) veraison			zber (ZB) harvest		
	priem	prvý	posl	priem	prvý	posl	priem	prvý	posl	priem	prvý	posl	priem	prvý	posl
RV	23.4.	4.4.	5.5.	3.5.	13.4.	16.5.	15.6.	28.5.	1.7.	29.8.	9.8.	23.9.	14.10.	25.9.	6.11.
		1974	1980		1974	1987		2000	1978		2000	1978		2000	1980
M-T	20.4.	3.4.	30.4.	30.4.	12.4.	12.5.	11.6.	26.5.	25.6.	13.8.	30.7.	31.8.	24.9.	7.9.	16.10.
		1974	1980		1974	1979		2000	1978		2000	1978		2000	1980
			1997												
BB	16.4.	30.3.	28.4.	26.4.	7.4.	9.5.	9.6.	23.5.	23.6.	21.8.	2.8.	13.9.	5.10.	12.9.	26.10.
		1974	1997		1974	1980		2000	1978		2000	1980		2000	1978
priem	20.4.	2.4.	1.5.	30.4.	11.4.	12.5.	12.6.	26.5.	26.6.	22.8.	3.8.	12.9.	4.10.	15.9.	26.10.
mean		1974	1980		1974	1980		2000	1978		2000	1978		2000	1980

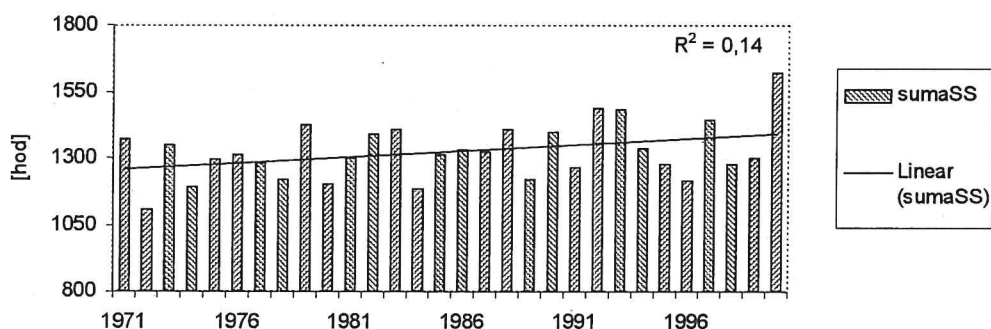
Tab. 2 Priemerné, najkratšie a najdlhšie trvanie medzifázových intervalov viniča hroznorodého, obdobie 1971 - 2000

Tab. 2 Mean, the shortest and the longest duration of the grapevine interphases intervals, period 1971 - 2000

Odr. Var.	Medzifázový interval- Interphases interval																																									
	PP - PL						PP - ZK						PL - ZK						ZK - MB						ZK - ZB						MB - ZB						PP - ZB					
	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl	priem	najkr	najdl												
RV	10	4	21	53	35	82	44	25	73	75	67	86	121	103	137	46	36	72	173	152	196	186	174																			
M-T	9	4	21	52	34	77	42	23	68	62	48	70	105	86	121	42	32	58	156	138	183	186	174																			
BB	10	4	20	54	34	80	43	29	74	73	64	84	119	103	131	45	32	56	172	148	189	2000	1974																			
priem	10	4	21	53	34	90	43	26	72	70	60	78	115	97	127	44	38	53	167	149	189	2000	1974																			
mean		2000	1991		1993	1974		1979	1974		1987	1980		1987	1971		1987	1978		2000	1974																					



Obr. 10 Počty letných a tropických dní za apríl až september [obdobie 1971-2000]
Fig. 10 Number of warm and tropical days from April to September [period 1971-2000]



Obr. 11 Trvanie slnečného svitu v hodinách za apríl až september [obdobie 1971-2000]
Fig. 11 Sunshine duration in hours from April to September [period 1971-2000]

Pučanie púčikov významne ovplyvnil výskyt priemernej dennej teploty vzduchu $T_d \geq 10^\circ\text{C}$ v marci. Korelačný koeficient medzi priemerným dátumom pučania púčikov a sumou priemernej dennej teploty $T_d \geq 10^\circ\text{C}$ v marci dosiahol hodnotu $-0,811$. Výskyt dní s takouto priemernou dennou teplotou vzduchu mal štatisticky málo preukazný klesajúci lineárny trend ($P > 0,1$). Na druhej strane sa mierne zvyšoval počet dní s $T_{\min} < 0^\circ\text{C}$ v januári až marci ale bez štatisticky preukazného stúpajúceho lineárneho trendu. Priamy vzťah medzi počtom takýchto dní v druhej polovici chladného polroka a priemerným dátumom pučania púčikov bol tiež vysoko preukazný (koeficient korelácie $0,622$). Tieto teplotné pomery pred začiatkom vegetačných aktivít viniča hroznorodého v rokoch 1971 až 2000 vplyvali na mierny posun pučania púčikov do neskoršieho obdobia.

Od fenologickej fázy začiatok kvitnutia teplota vzduchu významne ovplyvnila ďalší vývin viniča hroznorodého a bola jedným z faktorov, ktorý urýchlil dozretie plodov. Koeficienty korelácie medzi priemernými dátumami fenologických fáz začiatok kvitnutia, mäknutie bobúľ a zber s príslušajúcimi sumami priemerných denných teplôt vzduchu $T_d \geq 10^\circ\text{C}$ a počtami letných dní boli vysoko preukazné (Tab. 3).

Tab. 3 Korelačné koeficienty medzi priemerným dátumom fenologických fáz a teplotnými charakteristikami, obdobie 1971-2000

Fenologická fáza	Suma $T_d \geq 10^\circ\text{C}$ mesiace	koeficient korelácie	letné dni mesiace	koeficient korelácie
pučanie púčikov	III.	$-0,811$		
začiatok kvitnutia	V.	$-0,817$	IV. - V.	$-0,768$
mäknutie bobúľ	VI. - VII.	$-0,614$	VI. - VII.	$-0,637$
zber	IV. - IX.	$-0,739$	IV. - IX.	$-0,690$

Koeficienty korelácie medzi priemerným trvaním medzifázových intervalov začiatok kvitnutia – máknutie bobúľ aj začiatok kvitnutia – zber a príslušnými teplotnými sumami alebo počtami letných dní boli nižšie, ale tiež štatisticky preukazné (Tab. 4). Najvyššia štatisticky preukazná korelácia ($P > 0,001$) bola pri trvaní medzifázového intervalu pučanie púčikov – začiatok kvitnutia a počte letných dní v apríli a máji. Počet letných dní v týchto dvoch mesiacoch sa mierne zvyšoval, ale bol bez štatisticky preukazného stúpajúceho lineárneho trendu. Za obdobie 1971 – 1990 pri podobnom hodnotení na dvoch lokalitách v Slovinsku ešte nebol zistený preukazný vplyv vyššej teploty vzduchu na trvanie medzifázových intervalov viniča hroznorodého [6].

Tab. 4 Korelačné koeficienty medzi priemerným trvaním medzifázových intervalov a teplotnými charakteristikami, obdobie 1971-2000

Medzifázový interval	teplotná suma mesiace	koeficient korelácie	letné dni mesiace	koeficient korelácie
PP - ZK	IV. – V.	-0,539	IV. – V.	-0,695
ZK - MB	VI. - VII.	-0,442	VI. - VII.	-0,521
PP - ZB	IV. - IX.	-0,558	IV. - IX.	-0,587

Toto porovnanie vývinu viniča hroznorodého vo vegetačnom období s vybranými teplotnými charakteristikami rokov 1971 až 2000 ukazuje možnosti posunu v nástupe fenologických fáz a v trvaní medzifázových intervalov pri zmene teplotných pomerov na danej lokalite. Zlepšovanie teplotných podmienok na pestovanie viniča bolo pozorované aj v iných oblastiach mierneho pásma [5]. Okrem iného sa prejavilo aj na lepšej kvalite vína v posledných desaťročiach v našich ale aj v iných pestovateľských oblastiach [3, 4, 5].

Korelačný koeficient medzi trvaním slnečného svitu v hodinách za apríl až september a priemerným trvaním medzifázového intervalu pučanie púčikov – zber mal hodnotu $-0,575$. Opäť to bol štatisticky vysoko preukazný vplyv ($P > 0,001$) tohoto meteorologického prvku na vývin viniča hroznorodého vo vegetačnom období.

ZÁVER

Ak vychádzame z predpokladu, že počas vegetačného obdobia vďaka mohutnej koreňovej sústave nedochádzalo k významnému nedostatku dostupnej pôdnej vody, najdôležitejším meteorologickým prvkom, ktorý ovplyvnil vývin viniča hroznorodého na lokalite Dolné Plachtince, bola teplota vzduchu. Požiadavky tejto teplomilnej plodiny na teplotu vzduchu v období od pučania púčikov do plnej zrelosti boli splnené v kratšom časovom intervale predovšetkým v etape vývinu od začiatku kvitnutia do plnej zrelosti, teda od júna do septembra. Skoršie splnenie teplotných požiadaviek sa však objavilo už aj v nástupe začiatku kvitnutia.

Tieto výsledky je možné aplikovať pri modelovaní vývinu aj monitorovaní vplyvu klimatickej zmeny na vinič hroznorodý a z hľadiska praxe v šľachtení a agrotechnike pestovania tejto plodiny.

LITERATÚRA

- [1] Braslavská, O., Borsányi, P., Lajko, J., 1998: Porovnanie troch odrôd viniča hroznorodého na agrometeorologickej stanici Dolné Plachtince v rokoch 1971 – 1996. Zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie BPD 1997 „Bioklimatológia v systéme prírodných vied“ II. Fytobioklimatológia, Nitra, 80 – 85.
- [2] Carbonneau, A., Riou, C., Guyon, D., Riou, J., Schneider, C., 1992: Agrometeorologie de la vigne en France. CCE, Luxmbrug, 165 s.
- [3] Bujdoš, G., Magdina, P., Ailer, Š., 1998: Vplyv klimatických faktorov na kvalitu vína v minulosti a súčasnosti. Zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie BPD 1997 „Bioklimatológia v systéme prírodných vied“ II. Fytobioklimatológia, Nitra, 98 – 102.
- [4] Jones, V.G., Davis, R.E.: Climate Influence on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. Am.J.Enol.Vitic., Vol. 51, No3, 249 – 261.
- [5] Nemani, R., White, M.A., Cayan, D.R., Jones, V.G., Running, S.W., Coughlan, J.C., 1999: Asymmetric climatic warming improves California vintages. Proceedings of the 15th International Congress of Bioclimatology and International Conference on Urban Climatology. Sydney, 8.-12.11.1999
- [6] Žut, A.: Zveze med dolžinami medfaznih obdobj vinke trte (Vitis vinifera) in vsotami temperatur nad izbranimi temperaturnimi pragovi v Sloveniji. Razprave, 31, 1 s.41 – 50.

Tendencies and trends in the grapevine growing season at the locality Dolné Plachtince from 1971 to 2000

Oľga Braslavská, Slovak Hydrometeorological Institute, Regional Centre, Banská Bystrica

Grapevine is grown in the southern parts of Slovakia for a long time. This plant species sensitive to a heat and light regime with a deep root system usually does not suffer by the deficiency in the available ground water supply during the growing season. Due to its sensitivity to climate conditions it is convenient to be used like an indicator of the climate change - especially variability and changes in the air temperature conditions.

The first objective of the study was to identify the tendencies or trends in the phenological event timing during the grapevine growing season (from April to September) at the locality Dolné Plachtince (alt. 228 m, lat. 48°12' and long. 19°18') in the period 1971 – 2000. Phenological phases were selected so that they can cover the whole grapevine-growing season. The five phenological phases budburst (PP), first leaves (PL), beginning of flowering (ZK), veraison (MB) and harvest (ZB) and convenient interphases intervals PP – PL, PP – ZK, PL – ZK, ZK – MB, MB – ZB and PP – ZB were recorded on three grapevine varieties Rízlíng vlašský, Müller-Thurgau and Burgundské biele.

The second objective was to compare the phenological event timing with the air temperature conditions of the growing season expressed by the degree-days (threshold $T_d \geq 10$ °C), by the number of warm days ($T_{\max} \geq 25$ °C) and by the number of tropical days ($T_{\max} \geq 30$ °C). Besides it, we calculated number of days ($T_{\min} \leq 0$ °C) from January to March for the first spring phenological phases appearance. Then we calculated the sunshine duration in the growing season. Data were recorded at the meteorological station located in the vineyard area.

The onset of two first phenological phases in the grapevine growing season was without any significant trends – the mean budburst date shifted in three days and the mean first leaves unfolding date in one day later. Next phenological phases shown decreasing linear trends, it means that mean beginning of flowering date shifted earlier in eight days ($P > 0,1$), mean veraison date shifted earlier in eleven days ($P > 0,05$) and mean harvest date shifted earlier in 15 days ($P > 0,05$). These trends influenced also the duration of the interphase interval budburst – harvest that shown a shortened mean duration of the grapevine growing season in 15 days ($P > 0,05$). In the part of the vegetation season (from June to September) with the heat security the onset of every next phenological phase was strongly correlated with the directly preceding one. An earlier beginning of flowering was succeeded by an earlier veraison onset (correlation coefficient 0,877) and by an earlier harvest, too (correlation coefficient 0,727).

Chosen air temperature characteristics of the growing season in the period 1971 – 2000 had increasing linear trends. Degree-days (threshold $T_d \geq 10$ °C) increased approximately in 270 °C ($P > 0,05$), number of warm days in 24 days ($P > 0,05$) and tropical days in 14 days ($P > 0,01$). It can be seen that number of warm and tropical days has been rising from the beginning of the eighties, especially. The moderate negative shift of the mean budburst date can be influenced by an moderately decreasing number of days with $T_d \geq 10$ °C in March and on the other side a moderately increasing number of days with $T_{\min} \leq 0$ °C from January to March but without any significant trend. Correlation coefficients between the mean date of the beginning of flowering, veraison and harvest and chosen air temperature characteristics degree-days and the number of warm days were high significant ($P > 0,001$). Correlation coefficients between the interphase intervals and the air temperature characteristics were lower (from $P > 0,05$ to $P > 0,01$). The sunshine duration in hours from April to September in the period 1971 – 2000 increased approximately in 130 hours ($P > 0,05$) and the correlation coefficient with interphase interval budburst – harvest was also very significant ($P > 0,001$).

In conclusion, the shift in the phenological event timing and the shortening in the duration of interphase intervals caused a shorter duration of the grapevine growing season at the locality Dolné Plachtince in the period 1971-2000. Quantity changes in abiotic meteorological elements were detectable in the air temperature conditions expressed by the degree-days and number of warm and tropical days and sunshine duration conditions during the growing season. The results can be appreciated in the monitoring and modeling of the grapevine growing season than in the cultivation and new varieties breeding of grapevine, too.

NÁSTUP FENOLOGICKÝCH FÁZ SMREKA OBYČAJNÉHO A ZMENY KLÍMY

Viera Luknárová, Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

1. ÚVOD

Z predpokladu očakávanej klimatickej zmeny vyplývajú následné zmeny aj v klimatických podmienkach lesných spoločenstiev. Sledovaním nástupu, priebehu a ukončenia jednotlivých fenologických fáz za dlhšie časové obdobia je možné sledovať zmeny klímy a následne aj ich vplyv na vegetáciu.

Jedným z najdôležitejších meteorologických prvkov, ktorý ovplyvňuje začiatok vegetačného obdobia, je teplota vzduchu. Na nástup a priebeh fenologických fáz pôsobia okrem teploty vzduchu aj ďalšie meteorologické prvky, ktorých účinok na rastliny sa však prejavuje priamo alebo nepriamo opäť cez teplotu vzduchu.

Smrek obyčajný (*Picea abies* (L.) Karst.), ktorý patrí medzi najviac zastúpené lesné dreviny na Slovensku, je citlivý na vysoké teploty a má veľké nároky na vodu. V súvislosti s predpokladom rastúceho deficitu atmosférických zrážok a rastu priemernej teploty vzduchu (Škvarenina et al., 1996) bol analyzovaný nástup jarných fenologických fáz smreka obyčajného za dlhšie časové obdobie.

2. MATERIÁL A METÓDY

Základným materiálom na analýzu boli archívne údaje nástupov fenologických fáz smreka obyčajného zo Slovenského hydrometeorologického ústavu. Metodiky fenologického pozorovania používané na SHMÚ prešli niekoľkými zmenami, k podstatnej zmene došlo v roku 1986, kedy boli prerušené časové rady pozorovaní, predovšetkým lesných rastlín (Pifflová et al., 1956; Návod..., 1984; Braslavská, Kamenský, 1996; Dunajský, 1996). Z tohto dôvodu bolo osobitne hodnotené obdobie rokov 1961-1985 (20 fenologických staníc) a obdobie rokov 1986-1998 (28 fenologických staníc). Vybrané fenologické fázy sú porovnateľné podľa metodík v oboch analyzovaných obdobiach.

Vybrané boli stanice s najkompletnejšími časovými radmi pozorovania smreka obyčajného z celého Slovenska. Analyzovaná bola jedna vegetatívna fenologická fáza - prvé májové výhonky (PMV) a jedna generatívna fáza - začiatok kvitnutia (ZK). Dátumy nástupov fenologických fáz boli vyjadrené poradovými číslami dňa od začiatku roka.

Osobitne boli analyzované údaje z každej fenologickej stanice ako aj zo všetkých vybraných staníc za jednotlivé hodnotené obdobia, a to aj podľa rozdelenia na stanice do nadmorskej výšky 500 m a nad 500 m. Priebeh nástupu sledovaných fenologických fáz smreka obyčajného za 25-ročné obdobie bol nadviazaný na nasledujúce 13-ročné obdobie. Nástup fenologických fáz bol hodnotený aj v závislosti od nadmorskej výšky.

Na vyhodnotenie analyzovaných údajov boli vypočítané základné štatistické charakteristiky nástupných termínov fenologických fáz. Pre konkrétne fenologické stanice bol vypočítaný aritmetický priemer, smerodajná odchýlka, najskorší a najneskorší dátum s rokom výskytu, variačné rozpätie, medián, dolný a horný kvartil.

Pre všetky fenologické stanice, ako aj pre priemer za celé Slovensko bola urobená trendová analýza nástupu hodnotených fenologických fáz za príslušné obdobia.

3. VÝSLEDKY

3.1. Štatistické charakteristiky nástupných termínov fenologických fáz smreka obyčajného

Zo základného štatistického spracovania fenologickej fázy *prvé májové výhonky* za obdobie rokov 1961-1985 (tab.1) vyplýva, že v oblastiach do 500 m n. m. nastupovali v priemere od 29.4. do 7.5., v polohách nad 500 m n. m. boli zaznamenané nástupy tejto fenofázy od 9.5. do 25.5.

Najskorší dátum nástupu prvých májových výhonkov v polohách do 500 m n. m. bol 8.4. v roku 1961 na fenologickej stanici Turá Lúka, kde bol zaznamenaný súčasne aj najneskorší nástup, a to 2.6.1980. Na tejto

stanici boli aj najrozptýlenejšie nástupy tejto fenofázy okolo aritmetického priemeru. Na fenologických stani-
ciach Turany nad Ondavou a Choňkovce naopak boli smerodajné odchýlky najmenšie.

Najskorší nástup prvých májových výhonkov na fenologických staniaciach nad 500 m n. m. bol 17.4.1961 a
najneskorší nástup 10.6.1965. V práci Defilu (1991) je zhodný rok najskoršieho nástupu prvých májových
výhonkov smreka obyčajného vo Švajčiarsku (1961) s vyššie uvedeným najskorším dátumom. Najneskorší
dátum nástupu májových výhonkov je v uvedenej práci v roku 1979 a druhý najneskorší v roku 1980.

Z pohľadu frekvencie výskytu najskorších termínov nástupu fenologickej fázy na jednotlivých fenologických
staniaciach bol najfrekventovanejším rok 1961 (9-krát) a rok 1966 a 1972 (4-krát). Najneskoršie dátumy nástu-
pu fenofázy sa na jednotlivých staniaciach vyskytovali v roku 1980 (8-krát) a v roku 1965 (6-krát).

Najväčšie variačné rozpätie (rozdiel medzi najskorším a najneskorším nástupom fenologickej fázy) bolo na
fenologickej stanici Turá Lúka (55 dní) a najmenšie v Turanoch nad Ondavou (16 dní), v Choňkovciach (19
dní) a v Toryskách (19 dní), čo korešponduje aj s predchádzajúcimi extrémnymi hodnotami štatistických cha-
rakteristík.

Stredné hodnoty nástupu prvých májových výhonkov vyjadrené mediánom, sa pohybovali od 1.5. do 28.5.,
pričom sa odlišovali od hodnôt vyjadrených priemerom maximálne o tri dni. Najväčší rozdiel medzi dolným a
horným kvartilom (kvartilová odchýlka) bol v Turej Lúke, najmenší mali Choňkovce, čo tiež súvisí s predchá-
dzajúcimi štatistickými výsledkami.

Zo štatistických charakteristík nástupu fenologickej fázy *začiatok kvitnutia* smreka obyčajného za analyzované
25-ročné obdobie (tab.2) je vidieť neskorší priemerný nástup tejto fenofázy oproti prvým májovým výhonkom
(3.5.-19.5.) v polohách do 500 m n. m. Na staniaciach situovaných nad 500 m n. m. smrek začal kvitnúť v
priemere od 3.5. do 29.5.

Najskorší nástup fenofázy začiatok kvitnutia bol do 500 m n. m. 11.4.1966, najneskorší, o dva dni neskôr ako
pri prvých májových výhonkoch a na tej istej stanici (Turá Lúka), v roku 1980. Tam sa opäť vyskytli najroz-
ptýlenejšie nástupy fenofázy začiatok kvitnutia okolo aritmetického priemeru. Najmenšia smerodajná odchýl-
ka bola, tak ako pri nástupe prvých májových výhonkov, na staniaciach Turany nad Ondavou a Choňkovce.

Na fenologických staniaciach nad 500 m n. m. bol najskorší nástup fenofázy začiatok kvitnutia zaznamenaný o
dva dni neskôr ako pri prvých májových výhonkoch a v tom istom roku (1961). Najneskorší nástup pripadol
na rok 1980, tiež o dva dni neskôr.

Najväčšia frekvencia výskytu najskorších termínov nástupu fenofázy začiatok kvitnutia smreka obyčajného na
jednotlivých fenologických staniaciach bola v roku 1961 (8-krát) a v roku 1966 (5-krát), čo zodpovedá výsled-
kom pri nástupe prvých májových výhonkov. Podobne tiež najneskoršie nástupy tejto fenofázy pripadli na rok
1980 (8-krát). Najskoršie nástupy prvých kvetov a prvých listov, resp. prvých májových výhonkov v roku 1961
boli zaznamenané aj pri iných lesných drevinách (Intribus et al., 1995), najneskoršie však v rokoch 1965 a
1985.

Hodnoty najväčšieho variačného rozpätia nástupu fenofázy začiatok kvitnutia sú podobné ako pri nástupe
prvých májových výhonkov, a to na fenologickej stanici Turá Lúka (54 dní) a najmenšie variačné rozpätie je
tiež na stanici Turany nad Ondavou (20 dní).

Stredné hodnoty nástupu fenofázy začiatok kvitnutia charakterizované mediánom sa pohybovali od 4.5. do
30.5., o dva až tri dni neskoršie ako pri nástupe prvých májových výhonkov. Od hodnôt vyjadrených prieme-
rom sa odlišovali raz o štyri dni (Červenica), v ostatných prípadoch maximálne o dva dni. Najväčšia kvartilov-
vá odchýlka bola na fenologickej stanici Klátova Nová Ves, najnižšia na tej istej stanici ako pri májových
výhonkoch, v Choňkovciach.

Podobné štatistické hodnotenie nástupu fenologických fáz na základe vypočítaných priemerných hodnôt, me-
diánu, smerodajnej odchýlky, najskoršieho a najneskoršieho nástupu je v publikácii Defilu (1992). Autor hod-
notí nástup fenofáz rôznych rastlinných druhov vo Švajčiarsku, v nadmorských výškach od 250 do 1805 m, za
obdobie rokov 1951-1990. Napríklad pri hodnotení nástupu prvých májových výhonkov smreka obyčajného
v nadmorskej výške 700 m (Illanz) za obdobie rokov 1961-1990, do ktorého spadá aj v tejto práci analyzované
25-ročné obdobie (1961-1985), je na fenologickej stanici Lazisko (687 m n. m.) priemerná hodnota a medián
len o jeden deň neskôr, smerodajná odchýlka o dva dni a najneskorší dátum nástupu o sedem dní neskôr, naj-
skorší dátum nástupu fenofázy je totožný.

Zo štatistických charakteristík nástupu prvých májových výhonkov za obdobie rokov 1986-1998 (tab.3) vyplýva, že do nadmorskej výšky 500 m bol v priemere nástup tejto fenofázy od 22.4. do 9.5., s najskorším dátumom nástupu 7.4. v roku 1990 (Ruskov) a najneskorším 17.5.1996 (Dolná Súča).

V nadmorskej výške nad 500 m bol nástup prvých májových výhonkov v priemere od 11.5. do 30.5. Najskorší nástup tejto fenofázy bol 22.4.1989 v Starých Horách, najneskorší nástup analyzovanej fenofázy sa vyskytol 15.6. 1991 na fenologickej stanici Turček.

Najväčšie variačné rozpätie medzi najskorším a najneskorším nástupom prvých májových výhonkov smreka obyčajného sa vyskytlo na lesnej fenologickej stanici Staré Hory (43 dní), kde bola vypočítaná aj najväčšia smerodajná odchýlka. Najmenšie variačné rozpätie sa zaznamenalo v Opatovej nad Váhom, kde boli spolu so stanicou Šalková najmenej rozptýlené hodnoty okolo aritmetického priemeru.

Najväčšia frekvencia výskytu najskorších nástupov tejto fenologickej fázy na jednotlivých fenologických staniaciach bola v roku 1989 (15 krát) a 1990 (8 krát). Najneskoršie dátumy nástupu prvých májových výhonkov sa vyskytli v roku 1987 (13 krát) a aj v rokoch 1988 a 1991. Fabian a Menzelová (1998) uvádzajú v roku 1987 a 1991 tiež neskoré nástupy prvých májových výhonkov smreka obyčajného.

Vypočítané stredné hodnoty, vyjadrené ako medián, sa líšili od priemeru na jednotlivých fenologických staniaciach jedenkrát o päť a o štyri dni, v ostatných prípadoch maximálne o tri dni. Pohybovali sa od 20.4. do 3.6. Najväčšia kvartilová odchýlka bola na stanici Staré Hory a v Ruskove, najmenšia v Liptovskom Jáne, v Starej Bystrici a Šalkovej.

Zo štatistického vyhodnotenia nástupu fenofázy začiatok kvitnutia smreka obyčajného za 13-ročné obdobie (tab.4) z vybraných lesných fenologických staníc vidieť, že najskôr začal kvitnúť 26.4. na rovnakej stanici ako pri prvých májových výhonkoch a najneskôr 9.6. v Malužinej, čo zodpovedá nástupom na lokalitách nad 500 m n. m.

V priemere začínal nástup tejto fenofázy od 12.5. na fenologickej stanici ako pri prvých májových výhonkoch (Jasov) do 28.5., tiež na tej istej stanici ako pri májových výhonkoch (Liptovský Ján).

Najväčšie variačné rozpätie nástupu fenofázy začiatok kvitnutia sa vyskytlo, ako pri májových výhonkoch, v Starých Horách (37 dní), kde tiež bola podobne vypočítaná aj najväčšia smerodajná odchýlka. Najmenšie variačné rozpätie sa vyskytlo na stanici Hronec.

Tak ako pri prvých májových výhonkoch, aj pri začiatku kvitnutia bola najväčšia frekvencia výskytu najskorších nástupov tejto fenofázy v rokoch 1989 a 1990, najneskorších v rokoch 1987 a 1991.

Hodnoty mediánu sa líšili od priemeru na jednotlivých fenologických staniaciach raz o štyri dni, na ostatných staniaciach maximálne o tri dni. Pohybovali sa od 8.5. do 27.5.

Najväčšia kvartilová odchýlka bola, podobne ako pri nástupe prvých májových výhonkov, na fenologickej stanici Staré Hory, najmenšia v Hronci.

Z vypočítaných priemerných štatistických charakteristík nástupu analyzovaných fenologických fáz je zrejmé, že za obdobie rokov 1961-1985 priemerný dátum nástupu prvých májových výhonkov smreka obyčajného je 10.5., čo sa zhoduje s dátumom, ktorý uvádza za obdobie rokov 1931-1960 Kurpelová (1963, 1972), na ktoré nadväzuje v tejto práci analyzované 25-ročné obdobie. V uvedenom období je však v priemere nástup fenofázy začiatok kvitnutia, ako aj najskorší a najneskorší priemerný nástup, v neskorších termínoch ako pri nástupe prvých májových výhonkov.

Z priemerných štatistických charakteristík za hodnotené 13-ročné obdobie (1986-1998) vyplýva, že priemerný dátum nástupu prvých májových výhonkov smreka obyčajného je 17.5., čo je o jeden deň skôr, ako sa uvádza v práci Braslavskej a Kamenského (1999), ktorí hodnotili 10-ročné obdobie (1986-1995). Priemerný najskorší nástup prvých májových výhonkov sa zhoduje (9.5.) a priemerný najneskorší nástup prvých májových výhonkov je vo vyššie uvedenej práci o jeden deň neskôr. Priemerný dátum nástupu fenofázy začiatok kvitnutia ako aj priemerný najskorší dátum nástupu fenofázy začiatok kvitnutia zaznamenali autori o dva dni neskôr. Pri priemernom najneskoršom dátume nástupu fenofázy začiatok kvitnutia to bolo o tri dni neskôr.

Priemerný nástup fenologickej fázy začiatok kvitnutia bol v rokoch 1986-1998 na fenologických staniaciach do 500 m n. m., ako aj nad 500 m n. m., skorší ako v období 1961-1985. Priemerný nástup prvých májových výhonkov v období 1986-1998 bol na fenologických staniaciach do 500 m n. m. tiež skorší ako v období 1961-1985, iba na fenologických staniaciach nad 500 m n. m. bol v priemere neskorší.

3.2. Trendové analýzy nástupu fenologických fáz

Priebeh nástupu fenofázy prvé májové výhonky za obdobie 1961-1985 má tendenciu posunu tejto fenofázy do neskorších termínov, čo sa prejavilo aj pri nástupe fenofázy začiatok kvitnutia, kde došlo na konci sledovaného obdobia k pozastaveniu tohto trendu. Podobnú tendenciu posunu nástupu skorých jarných fenologických fáz do neskorších termínov uvádza Defila (1991), kde od roku 1985 je zrejmy zlom k vývoju ku skorším termínom.

Pri 13-ročnom časovom rade (1986-1998) je pri nástupe prvých májových výhonkov naopak zrejma mierna tendencia posunu do skorších termínov a pri nástupe fenofázy začiatok kvitnutia posunu do neskorších termínov.

Tendencie posunov nástupu hodnotených fenologických fáz z jednotlivých staníc sa potvrdili aj z vypočítaných priemerných hodnôt, ktoré sú znázornené na obr. 1 a 2, a to aj v rozdelení podľa nadmorskej výšky 500 m a nad 500 m. V oboch sledovaných obdobiach je pri porovnaní nástupu analyzovaných fenologických fáz zaradených k príslušnej nadmorskej výške zrejmy podobný priebeh v jednotlivých rokoch ako je pri celkovom priemere za sledované obdobie. Nástupy fenologických fáz do 500 m n. m. oproti celkovému priemeru za analyzované obdobia sú v skorších termínoch, nad 500 m n. m. je nástup oboch fenofáz v neskorších termínoch.

Na vyjadrenie smeru a vývoja zmien nástupu analyzovaných fenologických fáz v príslušných obdobiach bola použitá trendová analýza. Pre jednotlivé fenologické stanice, pre každé sledované obdobie, ako aj pre priemerné hodnoty nástupu fenologických fáz na všetkých fenologických staniach, boli na zistenie trendu nástupu fenofázy použité rovnice priamky.

Pri hodnotení trendu priemerných nástupov fenofáz prvé májové výhonky a začiatok kvitnutia za obdobie rokov 1961-1985, je zrejmy z obr.3, ako aj z rovníc priamok, stúpajúci trend, čo znamená, že nástup oboch fenofáz sa posúva do neskorších termínov. Pri prvých májových výhonkoch ide o posun o 9,6 dňa, pri začiatku kvitnutia o 9,4 dňa. Podľa korelačných koeficientov ide o významnú tesnosť vzťahu. Na jednotlivých fenologických staniach bol posun k neskorším dátumom pri nástupe prvých májových výhonkov ako aj začiatku kvitnutia na 17-tich staniach z 20-tich analyzovaných.

Pri znázornení trendov priemerných nástupov oboch fenofáz za obdobie rokov 1986-1998 (obr.4), z rovníc priamok vyplýva, že nástup fenofázy začiatok kvitnutia má stúpajúci trend (posun o 2,2 dňa) ale podľa vypočítaného korelačného koeficienta s nízkym stupňom tesnosti. Prvé májové výhonky majú opačný, veľmi mierne klesajúci trend oproti analyzovanému 25-ročnému obdobiu (1961-1985), čo znamená, že ide o posun, hoci nie príliš významný, do skorších termínov, a to približne o 0,6 dňa.

Pri hodnotení nástupu fenofáz na jednotlivých fenologických staniach za obdobie 1986-1998 bol posun ku skorším dátumom pri nástupe prvých májových výhonkov na 16-tich staniach z 28 analyzovaných. Pri nástupe fenofázy začiatok kvitnutia bol zo 14-tich hodnotených staníc posun do skorších termínov iba na troch fenologických staniach, čo korešponduje s vypočítanými hodnotami korelačných koeficientov. Toto časové obdobie je charakteristické tým, že práve v týchto posledných rokoch mali ročné priemery teploty vzduchu významne rastúci trend (Lapin, 1996; Lapin et al., 1995).

Obe analyzované obdobia boli spojené a pre zistenie trendu nástupu bol použitý polynóm vyššieho stupňa.

Z grafického priebehu (obr.5), ako aj z polynómu druhého stupňa vidieť, ako dochádza pri oboch fenologických fázach po náraste k poklesu, to znamená k posunu nástupu do skorších termínov. Aj pri rozdelení fenologických staníc do 500 m n. m. a nad 500 m n. m. mala parabola podobný priebeh, ako na obr.5 pri oboch fenologických fázach.

Pri nástupe prvých májových výhonkov ide podľa vypočítaného korelačného koeficienta o vysoký stupeň tesnosti vzťahu, pri nástupe fenofázy začiatok kvitnutia o mierny stupeň tesnosti vzťahu.

Výsledky rôznych modelov nástupu májových výhonkov smreka obyčajného za obdobie rokov 1964-1993, ktoré naznačujú posun fenofázy do skorších termínov, sa nachádzajú v práci Fabiana a Menzelovej (1998). Predpoklady posunu jarných fenologických fáz do skorších termínov väčšiny rastlinných druhov napríklad aj za obdobie 1736-1947, podľa klimatických scenárov, sú uvedené v práci Sparks a Carey (1995). Braslavská a Borsányi (1995) uvádzajú, že za roky 1951-1990 väčšina druhov ovocných a lesných rastlín reagovala skorším nástupom fenofázy začiatok kvitnutia, a to pravdepodobne v súvislosti s predpokladanými zmenami teplotných pomerov na našom území. Defila (1992, 1996) uvádza pri zalistovaní pagaštana konského za obdobie

rokov 1808-1991 a 1808-1995 klesajúcu tendenciu, to znamená posun do skorších termínov. Sparks et al. (1997) uvádzajú za obdobie rokov 1947-1996, že pri niektorých drevinách dochádza ku skoršiemu zalisťovaniu v súvislosti s vyššími jarnými teplotami vzduchu.

V práci bola preukázaná závislosť nástupu fenologických fáz smreka obyčajného v obidvoch sledovaných obdobiach od nadmorskej výšky, ktorá sa prejavila oneskorením nástupu fenologických fáz s narastajúcou nadmorskou výškou (obr.6, 7).

Vertikálny výškový gradient predstavuje pri prvých májových výhonkoch za obdobie rokov 1961-1985 na 100 m hodnotu 2,76 dňa a začiatok kvitnutia smreka obyčajného sa oneskoruje o 1,73 dňa na každých 100 m výšky.

V rokoch 1986-1998 predstavuje oneskorenie pri prvých májových výhonkoch smreka obyčajného 3,27 na 100 m a oneskorenie začiatku kvitnutia 1,88 dňa na 100 m.

Čiastkové výsledky fenologickej analýzy smreka obyčajného boli spracované za rôzne časové obdobia v prácach Luknárovej (1996, 1998a, b, 2000).

4. ZÁVER

Hlavné výsledky práce je možné zhrnúť do týchto záverov:

1. Nástup fenologických fáz smreka obyčajného - prvé májové výhonky a začiatok kvitnutia v rokoch 1961-1985 sa posúval ku neskorším termínom, kde na konci tohoto obdobia došlo k pozastaveniu uvedeného trendu.
2. Nástup fenologickej fázy prvé májové výhonky za obdobie 1986-1998 sa posúval do skorších termínov.
3. Nástup fenologických fáz prvé májové výhonky a začiatok kvitnutia sa oneskoroval s narastajúcou nadmorskou výškou.
4. Trendová analýza potvrdila tendencie posunu nástupu vybraných fenologických fáz.

Výsledky práce preukázali posun nástupu jarných fenologických fáz do skorších termínov, ako jeden z možných dôsledkov klimatickej zmeny.

LITERATÚRA

- Braslavská, O., Borsányi, P., 1995: Výber reprezentatívnych fenologických staníc na hodnotenie dlhých radov fenologických fáz ovocných a lesných rastlín. NKP SR, MŽP SR, SHMÚ, Banská Bystrica, 14 s.
- Braslavská, O., Kamenský, L., 1996: Fenologické pozorovanie lesných rastlín. Metodický predpis. SHMÚ, Bratislava, 22 s.
- Braslavská, O., Kamenský, L., 1999: Fenologické charakteristiky ihličnatých drevín v období 1986-1995. Meteorologický časopis, 2, 3, 41-47.
- Defila, C., 1991: Pflanzenphänologie der Schweiz. Inaugural - Dissertation, Philosophischen Fakultät, Zürich, 235 s.
- Defila, C., 1992: Pflanzenphänologische Kalender ausgewählter Stationen in der Schweiz 1951 - 1990. Meteorologischen Anstalt, Zürich, 233 s.
- Defila, C., 1996: 45 years of phytophenological observations in Switzerland, 1951- 1995. Proceedings of 14th Intern. Congress of Biometeorology, Ljubljana, 175-183.
- Dunajský, E., 1996: Fenologické pozorovanie všeobecnej fenológie. SHMÚ, Bratislava, 126 s.
- Fabian, P., Menzel, A., 1998: Wie sehen Wälder von morgen aus aus der Sicht eines Klimatologen. Forstw. Cbl. 117, Wissenschafts-Verlag, Berlin, 339-354.
- Intribus, R., Khodour, M., Čabajová, Z., 1995: Bioklimatologicko - fenologická charakteristika Záhorskej nížiny a priľahlých svahov Malých Karpát. VŠP Nitra, SBS SAV, Bratislava, 9, 73 s.
- Kurpelová, M., 1963: Fenologická charakteristika vysoko položených kotlín na Slovensku. Geografický časopis, 15, 4, 241-263.
- Kurpelová, M., 1972: Fenologické pomery kraja. In: Klimatické a fenologické pomery Stredoslovenského kraja. HMÚ,

Bratislava, 325-414.

Lapin, M., 1996: Scenáre klimatickej zmeny. NKP SR, III, 5, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 6-11.

Lapin, M., Nieplová, E., Faško, P., 1995: Regionálne scenáre zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku. NKP SR, II, 3, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 19-54.

Luknárová, V., 1996: Fenologické pozorovanie ihličnatých drevín. In: Tradície a pokrok v meteorológii. ČHMÚ, Praha, 199-205.

Luknárová, V., 1998 a: Climate and phenological phases of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Slovakia. II. European conference on applied climatology in Vienna, 6 pp.

Luknárová, V., 1998b: Vplyv klímy na nástup prvých kvetov a májových výhonkov smreka obyčajného (*Picea abies* (L.) Karst.). In: Bioklimatológia v systéme prírodných vied. II. Fytobioklimatológia. SPU, Nitra, 109-113.

Luknárová, V., 2000: Fenologické pozorovanie smreka obyčajného a zmeny klímy. *Enviromagazín*, 5, 5, 14-15.

Návod pre fenologické pozorovanie lesných rastlín. SHMÚ, Bratislava 1984, 25 s.

Pifflová, L., Brabec, J., Lenner, V., Minář, M., 1956: Príručka pre fenologických pozorovateľov. HMÚ, Praha, 152 s.

Sparks, T.H., Carey, P.D., 1995: The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology*, 83, 321-329.

Sparks, T. H., Carey, P. D., Combes, J., 1997: First leafing dates of trees in Surrey between 1947 and 1996. *The London Naturalist*, 76, 15-20.

Škvarenina, J., Sťahelcová, K., Kamenský, L., 1996: Zrážková zabezpečenosť smreka obyčajného na vybraných lokalitách stredného Slovenska. In: Lesné ekosystémy a globálne klimatické zmeny. LVÚ, Zvolen, 89-96.

ONSET OF NORWAY SPRUCE PHENOLOGICAL PHASES AND CLIMATE CHANGE

Viera Luknárová, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava

SUMMARY

The global warming is one of the most serious environmental problems at present. Climatic changes can influence the evolution of the vegetation and can cause the shift of the phenological phases onset towards an earlier or later period.

In this work the date of the phenological phases (first flowers and first May sprouts) of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Slovakia is evaluated in the longer time period. It was made the trend analysis and the elementary statistic characteristics of the date of the phenological phases. The onset of the phenological phases was also evaluated in dependence on the altitude.

For the analysis there were chosen the phenological stations, which had the most complete phenological data of spruce using the methodology of the Slovak Hydrometeorological Institute. For the period 1961-1985 it was 20 phenological stations and for the period 1986-1998 28 ones.

The date of the first May sprouts and the first flowers in the period from 1961 to 1985 have rising trend at the majority of phenological stations, the both phenological phases shifted towards the later date. In the period from 1986 to 1998 the first flowers have still rising trend, but the first May sprouts have already declining trend. In the whole period (1961-1998) the trend is declining and both phenological phases shifted towards the earlier date.

This study indicates the possibilities of analysis of climate change impacts on the forest ecosystems using phenological series.

Tab.1 Štatistické charakteristiky prvých májových výhonkov smreka obyč.(1961-1985)

Fenologická stanica	priem.	smer. odch.	najsk. dátum	rok výskytu	najnesk. dátum	rok výskytu	var. rozp.	dolný kvartil	medián	horný kvartil
Turany n.Ondavou	124	4	116	1966,72	132	1980	16	120	124	127
Gbely	119	8	100	1961	134	1965	34	117	121	124
Choňkovce	123	5	115	1984	134	1974,82	19	122	123	124
Klátova Nová Ves	123	9	105	1972	138	1985	33	118	123	131
Dobrá Voda	124	9	105	1961	139	1984	34	120	123	131
Turá Lúka	126	11	98	1961	153	1980	55	119	128	134
Červenica	124	8	108	1964	134	1969,80	26	120	127	131
Horná Breznica	126	9	102	1961	143	1980	41	118	128	132
Očová	127	7	112	1972	139	1962	27	124	128	130
Blatnica	131	8	117	1972	154	1965	37	127	131	135
Stará Ľubovňa	132	7	119	1983	148	1965	29	127	130	135
Rešov	136	6	124	1961	145	1965	21	134	138	140
Makov	138	7	121	1966	151	1980	30	134	138	142
Krásna Lúka	129	8	107	1961	142	1985	35	125	130	136
Banský Studenec	131	10	116	1966	158	1980	42	127	130	137
Lazisko	136	8	124	1966	153	1962,63	29	130	136	140
Skalité	135	10	115	1961	158	1965	43	130	135	141
Zálesie	135	9	110	1961	152	1980	42	130	136	140
Pohorelá	145	9	123	1961	161	1965	38	140	148	152
Torysky	137	6	126	1968	145	1974,80	19	132	138	140

Tab.2 Štatistické charakteristiky začiatku kvitnutia smreka obyč. (1961-1985)

Fenologická stanica	priem.	smer. odch.	najsk. dátum	rok výskytu	najnesk. dátum	rok výskytu	var. rozp.	dolný kvartil	medián	horný kvartil
Turany n.Ondavou	139	5	130	1963,66	150	1980	20	136	139	143
Gbely	134	7	121	1963	148	1980	27	128	135	139
Choňkovce	123	5	110	1961	135	1978	25	120	124	126
Klátova Nová Ves	128	9	110	1972	141	1985	31	119	130	135
Dobrá Voda	131	10	110	1975	152	1981	42	129	133	136
Turá Lúka	131	12	101	1966	155	1980	54	126	132	136
Červenica	130	10	103	1961	140	1970,80	37	125	134	137
Horná Breznica	133	6	123	1966	152	1982	29	129	132	136
Očová	137	7	122	1983	150	1973	28	133	137	144
Blatnica	137	8	119	1972	154	1965	35	133	137	143
Stará Ľubovňa	123	9	110	1961	146	1985	36	118	122	130
Rešov	149	6	138	1961	160	1980	22	145	150	154
Makov	139	7	124	1961,66	152	1984	28	136	140	144
Krásna Lúka	139	7	127	1962	154	1970	27	134	139	145
Banský Studenec	133	9	119	1983	148	1962,80	29	124	135	139
Lazisko	140	7	124	1961	154	1980	30	136	140	144
Skalité	144	10	122	1968	164	1980	42	140	145	150
Zálesie	138	10	109	1961	154	1980	45	135	139	145
Pohorelá	141	6	130	1961,68	156	1963	26	138	140	145
Torysky	141	7	130	1966	157	1978	27	136	140	145

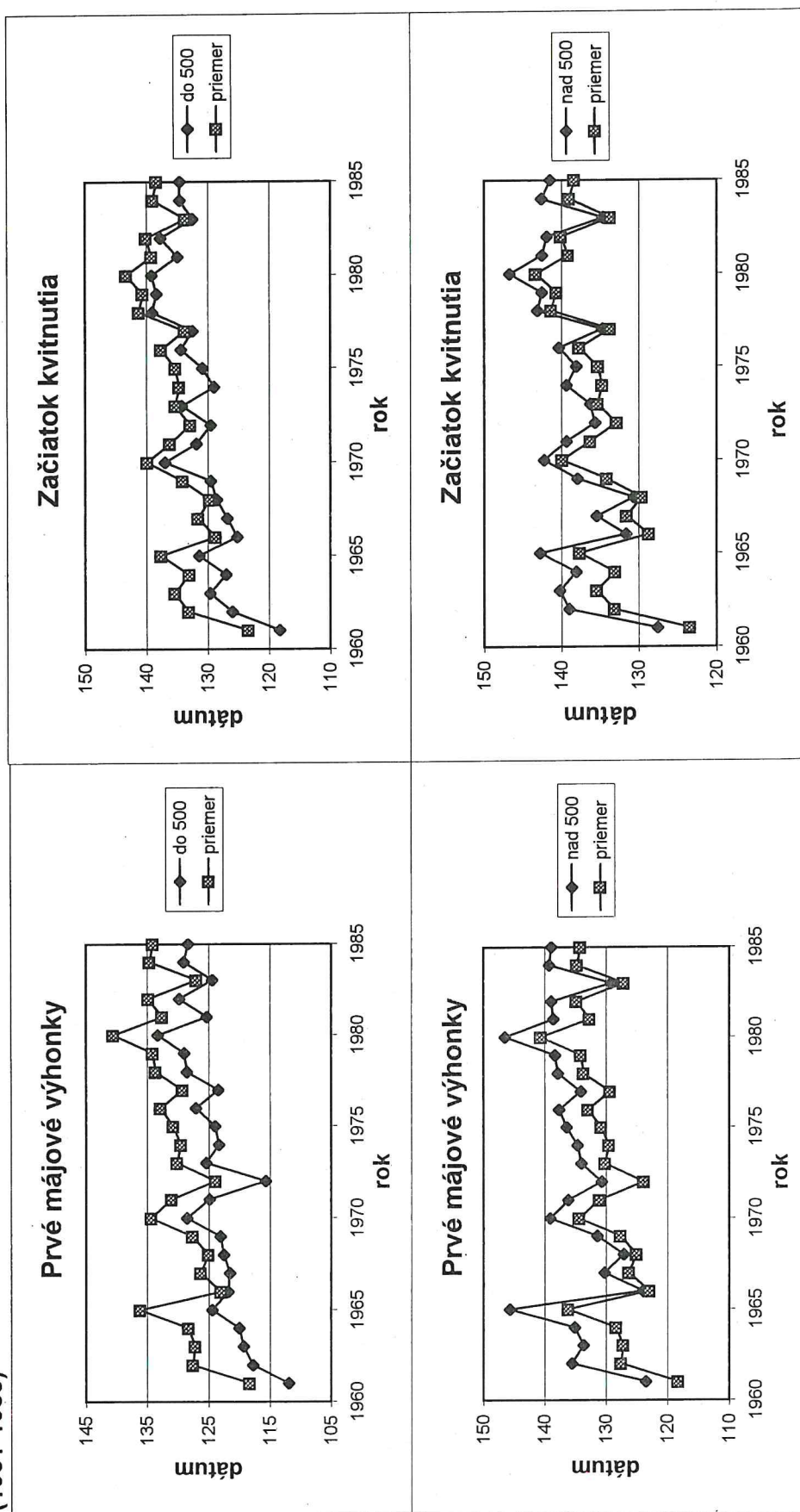
Tab.3 Štatistické charakteristiky prvých májových výhonkov smreka obyč. (1986-1998)

Fenologická stanica	priem.	smer. odch.	najsk. dátum	rok výskytu	najnesk. dátum	rok výskytu	var. rozp.	dolný kvartil	medián	horný kvartil
Giraltovce	120	10	100	1990	135	1988	35	114	123	127
Ruskov	112	8	97	1990	125	1987	28	106	110	119
Šalková	126	4	114	1989	130	1988	16	125	127	128
Opatová n. Váhom	129	4	122	1989	134	1988	12	126	129	131
Dolná Súča	127	7	109	1989	137	1996	28	125	128	132
Nová Bošáca	136	6	122	1989	143	1987	21	134	137	139
Banský Studenec	132	6	122	1989	144	1991	22	129	132	135
Krásno n. Kysucou	141	10	124	1998	151	1991,95	27	132	146	149
Stará Bystrica	143	6	128	1989	154	1987	26	140	144	145
Pružina	135	7	120	1989	145	1988	25	130	136	140
Jasov	131	8	113	1990	146	1988	33	128	130	136
Hubová	137	5	125	1989	147	1987	22	135	137	139
Staré Hory	132	12	112	1989	155	1987	43	125	129	138
Čierny Balog-Šaling	134	5	123	1989	145	1987	22	132	135	137
Brusno	135	5	125	1990	142	1987	17	134	135	139
Mlynky	135	6	126	1989,94	146	1987	20	132	134	139
Kežmarské Žľaby	137	7	125	1990	147	1987	22	131	138	145
Turček	145	8	136	1986	166	1991	30	140	145	148
Zubrohlava	148	7	135	1990	158	1991	23	140	151	154
Čierny Váh	147	8	135	1989	163	1987	28	140	147	152
Závadka n. Hronom	145	5	137	1989,90	153	1987,88	16	142	144	148
Oravice	150	6	138	1986	160	1991	22	146	151	154
Liptovský Ján	150	6	139	1997	157	1991	18	146	154	155
Hronec	150	5	142	1986	163	1986	21	147	149	151
Malužiná	149	7	139	1989	165	1987	26	143	148	153
Červená Skala	138	7	126	1989	146	1992,98	20	134	140	142
Pohorelá	142	7	131	1998	155	1987	24	136	143	146
Dolný Smokovec	144	7	133	1990,97	155	1988	22	137	142	150

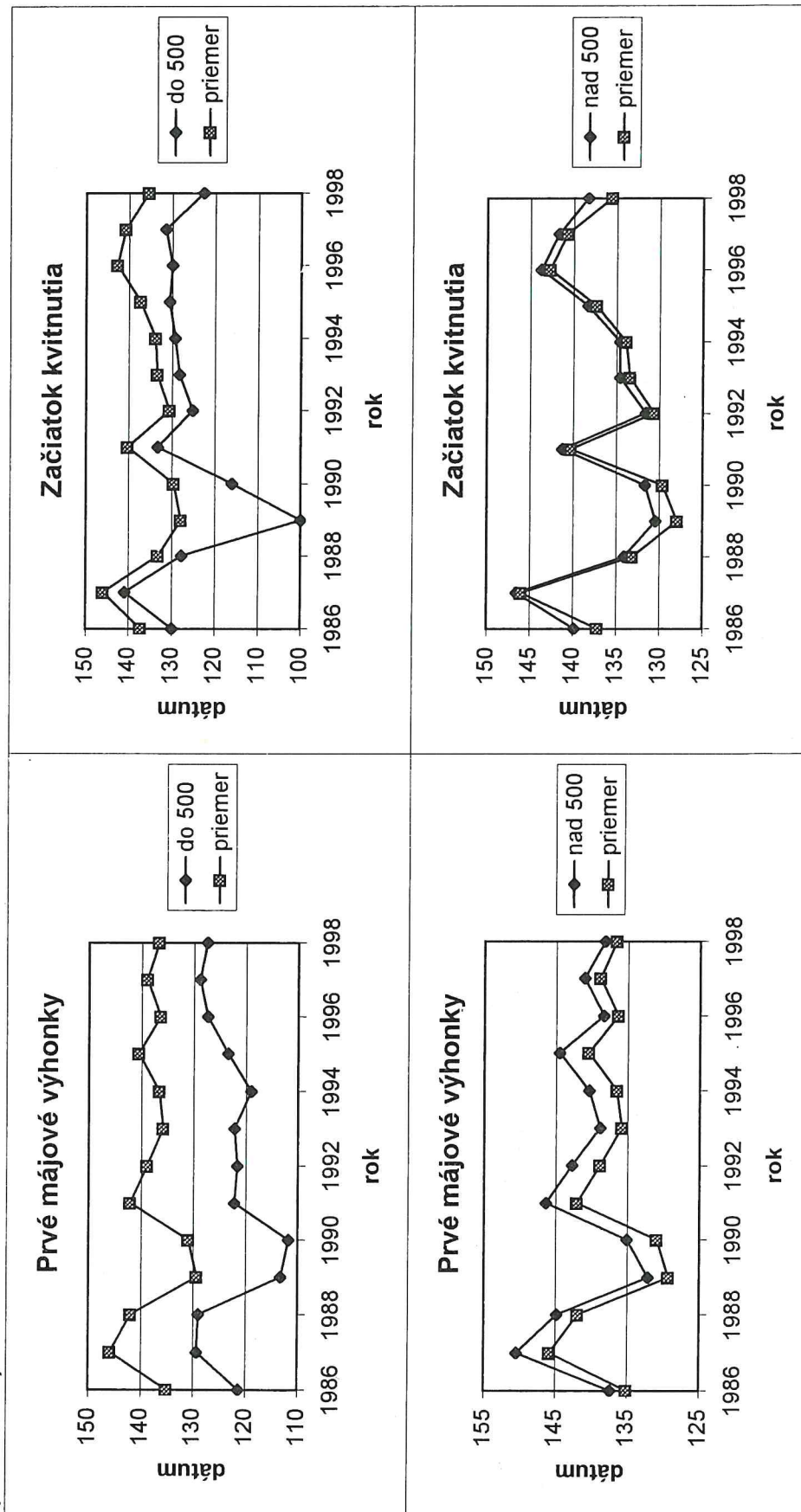
Tab.4 Štatistické charakteristiky začiatku kvitnutia smreka obyč. (1986-1998)

Fenologická stanica	priem.	smer. odch.	najsk. dátum	rok výskytu	najnesk. dátum	rok výskytu	var. rozp.	dolný kvartil	medián	horný kvartil
Jasov	132	8	116	1990	146	1995	30	126	134	135
Staré Hory	132	13	116	1989	153	1997	37	121	128	148
Mlynky	141	7	131	1992	155	1996	24	137	143	145
Kežmarské Žľaby	135	7	125	1990	145	1997	20	129	136	140
Turček	136	9	123	1993	154	1987	31	130	134	140
Čierny Váh	141	7	132	1990	153	1997	21	137	139	145
Závadka n. Hronom	141	6	131	1986	153	1991	22	135	141	144
Oravice	137	7	130	1992,93	151	1987	21	132	136	139
Liptovský Ján	148	4	139	1989	154	1996	15	146	147	152
Hronec	145	3	140	1992	151	1991	11	144	145	145
Malužiná	141	11	125	1989	160	1987	35	136	138	150
Červená Skala	136	7	123	1990	145	1987	22	134	137	140
Pohorelá	138	6	128	1989	148	1996	20	135	139	144
Dolný Smokovec	139	6	132	1989	148	1987	16	134	139	144

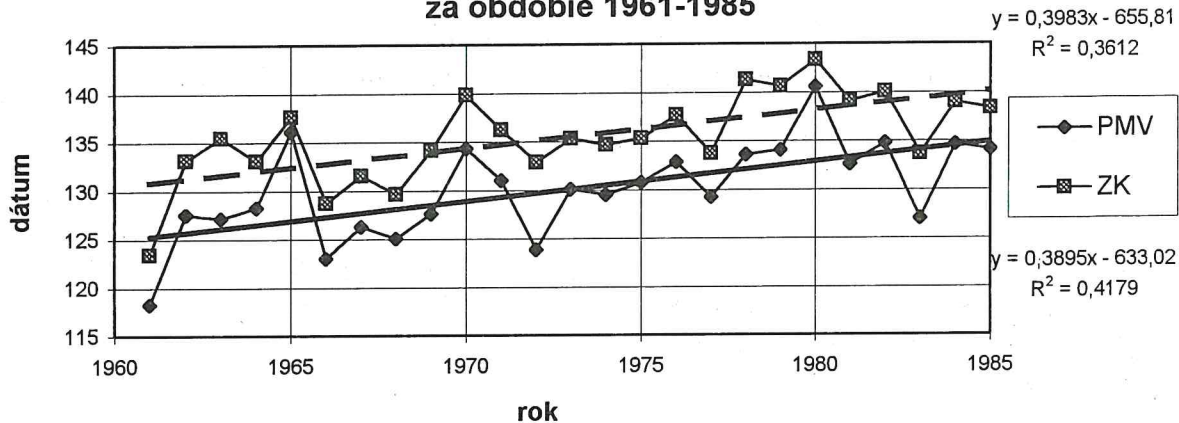
Obr. 1. Porovnanie priemerných nástupov fenologických fáz do 500 a nad 500 m n. m. s celkovým priemerom (1961-1985)



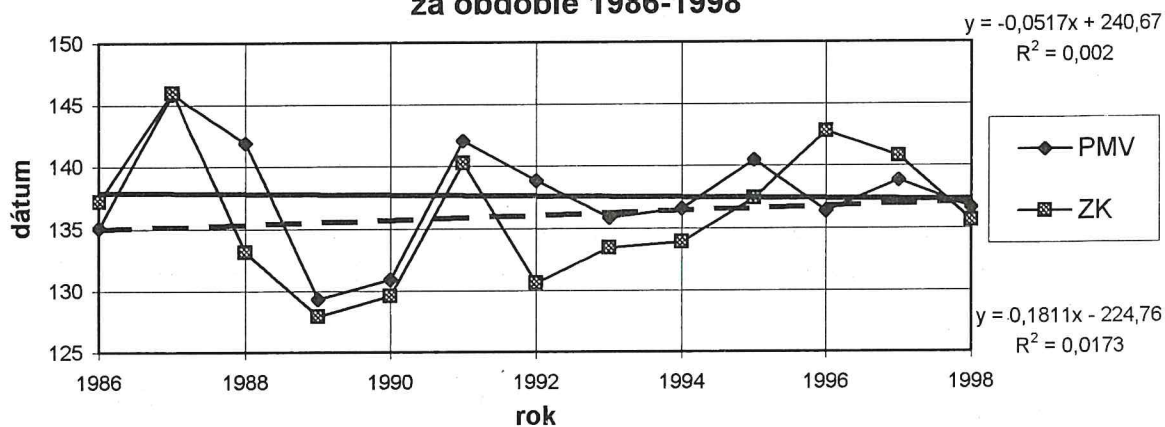
Obr. 2 Porovnanie priemerných nástupov fenologických fáz do 500 a nad 500 m n. m. s celkovým priemerom (1986-1998)



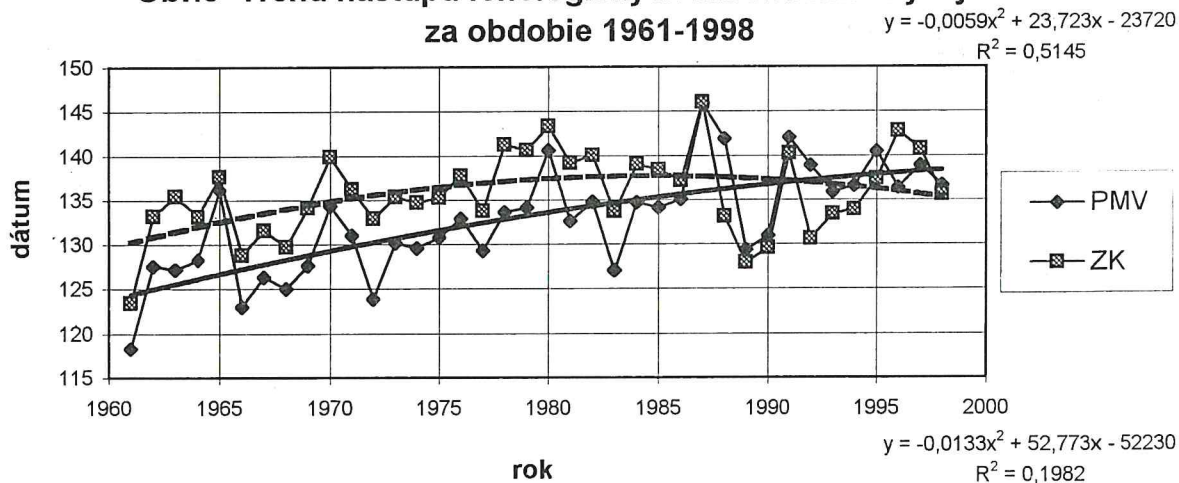
Obr.3 Trend nástupu fenologických fáz smreka obyčajného za obdobie 1961-1985



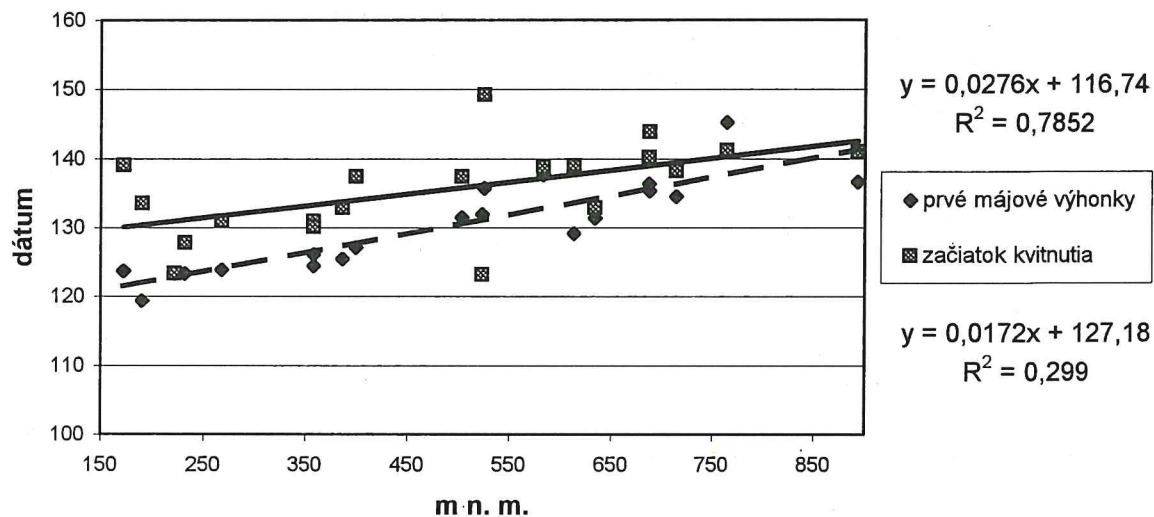
Obr.4 Trend nástupu fenologických fáz smreka obyčajného za obdobie 1986-1998



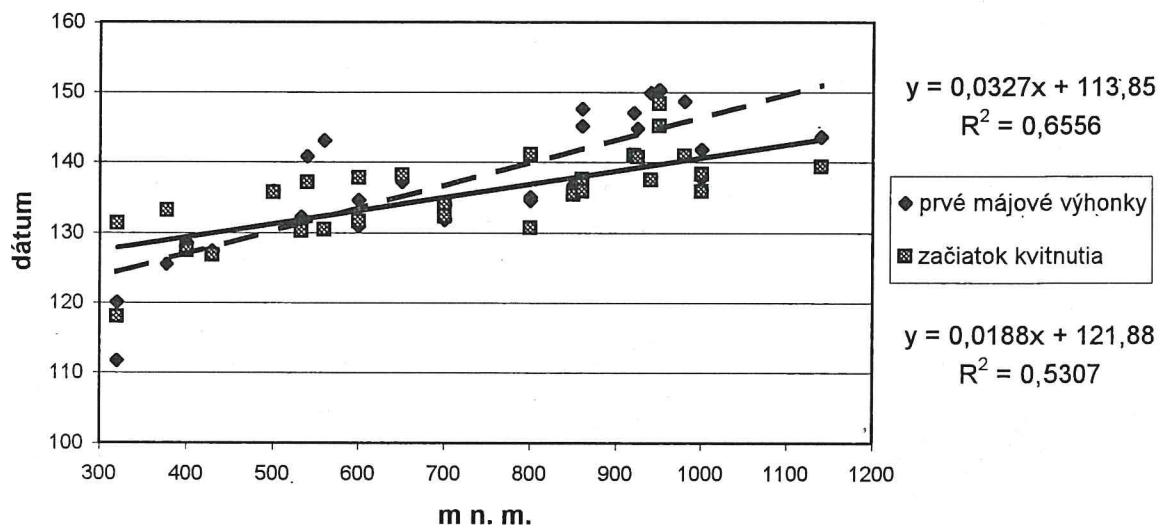
Obr.5 Trend nástupu fenologických fáz smreka obyčajného za obdobie 1961-1998



Obr. 6 Priemerný nástup fenologických fáz smreka obyčajného v závislosti od nadmorskej výšky (1961-1985)



Obr. 7 Priemerný nástup fenologických fáz smreka obyčajného v závislosti od nadmorskej výšky (1986-1998)



VPLYV KLIMATICKEJ ZMENY NA PRIEBEH ODTOKU V MALOM HORSKOM POVODÍ

Zdeněk Kostka, Ladislav Holko,

*Experimentálna hydrologická základňa, Ústav hydrológie, Slovenská akadémia vied, Ondrašovecká 16,
031 05 Liptovský Mikuláš, kostka@svslm.sk*

ÚVOD

Metodické postupy používané pri určovaní vplyvu klimatickej zmeny na hydrologický režim sa dajú rozdeliť do niekoľkých veľkých skupín, ktoré zahŕňajú analýzu časových radov, analýzu hydrologického režimu minulých teplých období a modelovanie na základe vzťahov medzi charakteristikami klímy a hydrologickým režimom. Podrobnú rešerš rôznych metodík uvedených v našej aj zahraničnej literatúre do roku 1997 uvádzajú Szolgay et al. (1997).

Cieľom tejto práce bolo posúdenie zmien odtoku v horskom povodí Jaloveckého potoka v Západných Tatrách spôsobených predpokladanou zmenou klímy. Ako nástroj sme zvolili distribuovaný, fyzikálne založený zrážkovo-odtokový matematický model WaSiM-ETH (Schulla, 1997; Schulla a Jasper, 1999) s denným krokom simulácie. Okrem zmien odtoku sme posudzovali aj zmenu vodnej hodnoty snehovej pokrývky.

Z hľadiska vyššie uvedeného rozdelenia metodických postupov možno použitý prístup zaradiť do tretej skupiny. V posledných rokoch boli zrážkovo-odtokové modely využívané na určovanie dôsledku klimatickej zmeny aj v našich podmienkach, pričom boli používané najmä konceptuálne modely s dlhším (mesačným) časovým krokom.

Petrovič (1998) sa zaoberal dôsledkami klimatickej zmeny na hydrologický režim v povodí Nitry, pričom použil vlastný matematický model pracujúci s mesačným krokom podobný modelu WatBal (Yates, 1994). Vodnú bilanciú povodia nahradil vodnou bilanciou virtuálneho bodu ležiaceho v ťažisku povodia a výpočet bol vykonaný pre dva profily na rieke Nitre. Halmová (1999, 2000) použila zrážkovo-odtokový model WBMOD na simuláciu očakávaných dôsledkov klimatickej zmeny v povodí Laborca a v oblasti vodného diela Orava. Čunderlík a Hlavčová (2000) pomocou modelu WatBal skúmali zmeny vnútoročného rozdelenia odtoku pre 4 povodia na strednom Slovensku. Hlavčová et al. (2000) aplikovali model na 6 vybraných profilov na Váhu, Bielej Orave, Kysuci, Nitre, Ipli a Rimavici.

V zahraničnej literatúre boli matematické modely použité na štúdium rôznych aspektov hydrologického cyklu. Okrem modelov s mesačným krokom sa viac používali aj fyzikálne založené modely pracujúce s kratším krokom (denným alebo hodinovým). Jones et al. (2000) študovali rôzne časové obdobia, v ktorých existuje vzťah medzi odtokom, spotrebou vody a vegetáciou v štyroch zalesnených povodiach s dlhodobými meraniami. Takýto vzťah sa v rôznych podmienkach prejavuje v rôznych časových mierkach (denná, sezónna, medziročná, atď.) napr. vplyvom na maximálny prietok počas zrážkovo-odtokových udalostí, na odtok počas bezzrážkového obdobia, atď. Autori tvrdia, že v časových mierkach, v ktorých sa dá definovať vzťah medzi vegetáciou a odtokom, je možné predpovedať vplyv klimatickej zmeny, prirodzenej variability a využitia krajiny (napr. odstránenia lesa).

Singh a Kumar (1997) použili model UBC na simuláciu reakcie povodia rieky Spiti v západných Himalájach na klimatickú zmenu. Simulované vodné hodnoty snehu sa príliš nezmenili, ale simulácie ukázali vysokú citlivosť topenia ľadovcov na zmeny klímy.

Ștănescu et al. (1998) použili pri určovaní dôsledkov klimatickej zmeny na režim odtoku v Rumunsku deterministický zrážkovo-odtokový model VIDRA-HYDROZ so združenými parametrami v troch pilotných povodiach s plochou 204-325 km². Na základe modelovania priemerného mesačného odtoku v pilotných povodiach určovali dopad klimatickej zmeny pre povodie rieky Arges (3130 km²), pričom na upscaling použili vzťahy medzi ročnými a mesačnými odtokmi a priemernou nadmorskou výškou povodia.

Lapp et al. (1999) kombinovali odhad zmien synoptických podmienok počas zimného obdobia v severnej Amerike s hydrometeorologickým modelom pracujúcim v mezo mierke na odhad snehových pomerov v alpínskom povodí v kanadskej časti Skalístých hôr. Očakávaný rast zrážok podľa nich nebude schopný kompenzovať pokles snehových zrážok spôsobených vyššou teplotou vzduchu (vyšším množstvom kva-

palných zrážok), následkom čoho dôjde k zníženiu akumulácie zrážok v snehovej pokrývke v zimnom období.

Čiastočne podobný prístup použili Hosoda a Nogami (2000), ktorí sa na základe analýzy kritickéj teploty prechodu zrážok medzi dažďom a snehom pokúsili odhadnúť zmenu množstva snehových zrážok v Japonsku spôsobenú zmenou klímy.

Pierce et al. (1999) použili model zahrňajúci topografiu, pôdne, klimatické a vegetačné pomery na odhad interakcií medzi zmenami využívania krajiny a environmentálnou zmenou a študovali dôsledky týchto interakcií vzhľadom na procesy v povodí.

Waichler (2000) použil distribuovaný hydrologický a vegetačný model na analýzu hydrologických procesov v povodí American River ležiacom v pohorí Cascade Range. Distribuovaný vegetačný model poskytol údaje o indexe listovej plochy (LAI), ktoré boli použité ako jeden zo vstupov do hydrologického modelu DHSVM. Podľa výsledkov vegetačného modelu by v súvislosti so zmenou klímy malo dôjsť k nárastu LAI. Pri scenári zníženej stomatálnej vodivosti to znamená, že ihličnaté lesy by mali byť hustejšie. Výsledky práce ukazujú, že priamy vplyv očakávaného zvýšenia teploty vzduchu, ktorý sa prejaví v znížení snehovej pokrývky a zmenenom režime odtoku a evapotranspirácie, je oveľa dôležitejší ako nepriamy vplyv LAI a stomatálnej vodivosti.

Ako uvádzajú Pekárová et al. (2000), prístup s využitím zrážkovo-odtokových modelov s mesačným krokom predstavuje z metodického hľadiska, dnes už "klasický" postup. "Slabiny tohoto prístupu sú ako v oblasti použitých scenárov (resp. ich zavádzania do modelu - absentujúce stochastické modely počasia), tak pri parametrizácii transformačnej funkcie povodí (jednoduché bilančné modely so sústredenými parametrami a pod.). Je otázne, či po využití existujúceho potenciálu klimatických scenárov a modelov pre niektoré doteraz neskúmané javy (ako napr. interakcia povrchových a podzemných vôd, tvorba zásob podzemných vôd, niektoré vodohospodárske výpočty a pod.) bude možné pokročiť touto cestou ďalej".

METODICKÝ PRÍSTUP

Hydrologické modely, používané pri odhade dôsledkov klimatickej zmeny by podľa možnosti mali byť založené na fyzikálnom základe. Modely typu čiernej skrinky nie sú pre tieto účely najvhodnejšie, pretože nepopisujú explicitne jednotlivé zložky hydrologického cyklu a teda neumožňujú výskum vplyvov zmien týchto zložiek následkom zmeny klímy. Navyše, takéto modely sa dajú kalibrovat' a verifikovať len na súčasné podmienky. Fyzikálne založené modely zahrňajú všetky dôležité časti hydrologického cyklu. Predpokladá sa, že základné fyzikálne procesy sa vplyvom klimatickej zmeny nezmenia. Rovnice, ktoré ich opisujú budú teda platiť aj za zmenených klimatických podmienok. Parametre fyzikálne založených modelov sú preto prenosné aj do zmenených klimatických podmienok. Veľmi zložité modely si však vyžadujú veľké množstvo údajov a parametrov.

Táto práca je založená na simulácii hydrologických procesov v dennom kroku. Použili sme pritom fyzikálne založený matematický model WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model). Model bol vyvinutý na simuláciu vodnej bilancie a prietoku pre denný alebo kratší časový interval a je schopný reprezentovať rýchlu hydrologickú odozvu typickú pre subalpínske a alpínske povodia (Grabs, 1997). Kalibrácia modelu s denným krokom pre povodie Jaloveckého potoka bola vykonaná pre vstupné údaje z hydrologických rokov 1989-1993 na základe porovnania simulovaného a meraného prietoku a vodnej hodnoty snehu. Verifikácia modelu s parametrami určenými počas kalibrácie bola vykonaná s údajmi z hydrologických rokov 1994-1999. Na základe získaných scenárov zmien zrážok a teploty vzduchu pre časové horizonty 2010, 2030 a 2075 sme upravili pôvodné vstupné údaje (zrážky a teplotu vzduchu z obdobia 1989-1999) a s týmito údajmi sme vykonali simuláciu pre celé obdobie 11 hydrologických rokov. Charakteristiky odtoku z povodia, vodnej bilancie a snehovej pokrývky za celé povodie a v troch výškových pásmach vypočítané so zmenenými vstupnými údajmi boli potom porovnané s charakteristikami z obdobia 1989-1999.

Matematický model WaSiM-ETH

Model WaSiM-ETH existuje v dvoch verziách líšiacich sa len spôsobom riešenia dynamiky pôdnej vody. Prvá verzia používa princíp hydrologickej podobnosti TOPMODELu a mohla by sa označovať ako semi-distribuovaná, kým druhá používa systém Richardsových rovníc a je to distribuovaná verzia. V tejto práci bola použitá verzia s Richardsovými rovnicami. Potenciálna a aktuálna evapotranspirácia je počí-

taná podľa Penman-Montheitha. Akumulácia a topenie snehu sa počíta niekoľkými spôsobmi – v tejto práci sme použili kombinovanú metódu podľa Andersona (1973). Infiltrácia je počítaná podľa vzťahu Greena a Ampta metódou upravenou Peschkem (in Dyck, 1983).

Časové rady vstupných údajov môžu mať minútový až denný krok, pričom sú potrebné minimálne teplota vzduchu a zrážky. Charakter priestorového rozloženia vstupných veličín závisí od zvoleného spôsobu interpolácie vstupných meteorologických údajov, pričom podmienkou je zadanie údajov z minimálne dvoch alebo viacerých meteorologických staníc v rámci skúmaného povodia, prípadne jeho najbližšieho okolia. Z interpolačných metód je možné zvoliť interpoláciu váženú vzdialenosťou, metódu výškového gradientu, kombináciu predchádzajúcich dvoch metód alebo členenie povodia na Thiessenove polygóny. Tieto mapy sú generované pre každý časový krok simulácie.

Vzhľadom na to, že sa jedná o distribuovaný model, vyžaduje sa taktiež vstup niektorých súborov v rastrovom tvare (rastrové mapy). Rastrové mapy charakterizujú priestorové vlastnosti povodia. Medzi nutné patria digitálny výškový model, mapa využitia krajiny (druhy vegetácie, vodné plochy, sídla, atď.), mapa pôdných druhov (charakteristika týchto druhov sa uvádza v parametrickom súbore), mapa zvolených zón, pre ktoré sa počítajú výstupné časové rady zvolených prvkov vodnej bilancie (výškové zóny, čiastkové povodia, atď.). Okrem týchto základných súborov sa podľa charakteru použitých výpočtov vyžadujú ďalšie rastrové súbory – expozícia a sklon svahov, nasýtená hydraulická vodivosť, využiteľné zásoby vody a iné.

Hydrologické modely používajú spravidla viaceré parametre, pričom ich počet stúpa s detailnosťou, akou model simuluje fyzikálne procesy. Vzhľadom na to, že nie všetky parametre sa rovnako významne prejavujú vo výpočtoch, je potrebné preskúmať vplyv najdôležitejších parametrov modelu na výsledky modelovania hydrologických procesov. Z metodického hľadiska to znamená vykonať analýzy citlivosti (Schulla, 1997). Na základe analýz citlivosti, ktoré vykonal Schulla (1997) s modelom WaSiM-ETH (verzia s Richardsovou rovnicou) sa ako najvýznamnejšie ukázali nasledovné parametre:

- odpor porastu voči prenosu vodných pár (vo výpočte evapotranspirácie)
- maximálna intercepčná kapacita (vo výpočte intercepcie)
- teplota prechodu medzi tekutými a pevnými zrážkami
- interval teplôt prechodu medzi tekutými a pevnými zrážkami
- hraničná teplota topenia snehu
- „degree-day“ faktor

Vstupné údaje - priestorová variabilita vstupov a parametrov v horských povodiach

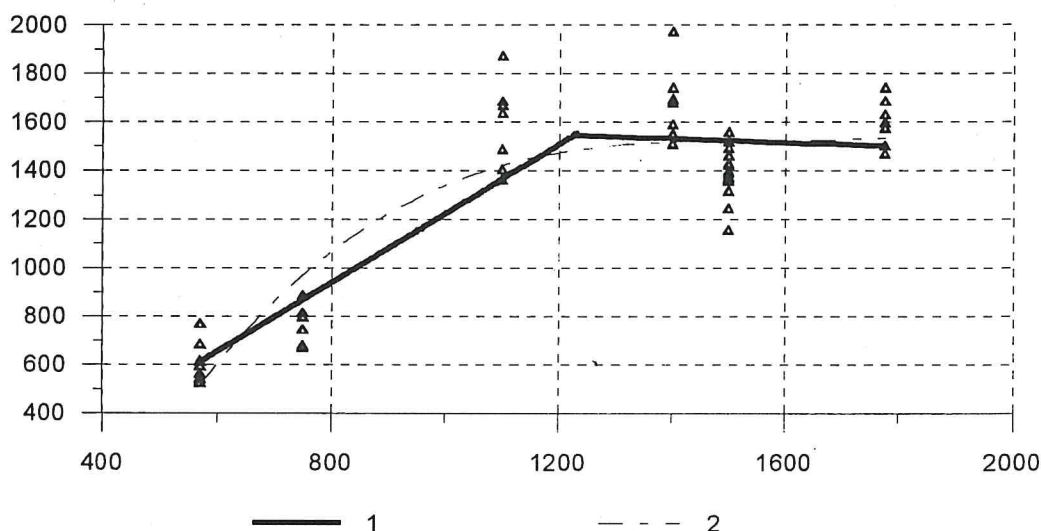
Horské povodia sú charakteristické veľkou priestorovou variabilitou reliéfu, s čím súvisí variabilita klimatických činiteľov, vegetácie, ale aj pôd. Variabilita sa prejavuje predovšetkým vo vertikálnom smere, pričom pri klimatických činiteľoch sa prejavuje vertikálnym gradientom, ale nezanedbateľná je aj variabilita v horizontálnom smere ovplyvnená orientáciou a sklonom svahov. Priestorová premenlivosť klimatických činiteľov druhotne ovplyvňuje zonálnosť vegetácie a prejavuje sa aj na charaktere pôd, pričom tu pristupuje aj faktor zvetrávania a transportu dolu svahom.

Transformácia bodových meraní zrážok na plošné charakteristiky v horských oblastiach predstavuje všeobecne značný problém. Pri štúdiu určovania priemerných mesačných a ročných úhrnov zrážok, potrebných pre bilančné výpočty, analyzovali Kostka a Holko (1998) viaceré metódy stanovenia priemerných hodnôt pre celé povodie. Priemerné mesačné hodnoty zrážok určené z meraní v šiestich totalizátoroch v povodí Jaloveckého potoka pomocou aritmetického priemeru, pomocou metódy Thiessenových polygónov alebo pomocou empiricky určenej závislosti zrážok na nadmorskej výške (gradientu) sa výrazne nelíšili.

Použitie hydrologických modelov si však väčšinou vyžaduje vstupy v podobe denných, prípadne hodinových údajov o zrážkach v povodí, ktoré neposkytujú merania v totalizátoroch alebo štandardných zrážkomeroch lokalizovaných v odľahlých častiach horského povodia. Preto je potrebné použiť extrapoláciu zo štandardných meteorologických staníc, lokalizovaných v povodí alebo v blízkosti povodia. Výpočtovo najjednoduchšou metódou extrapolácie je použitie vzťahu množstva dopadajúcich zrážok na nadmorskej výške (gradientu). Je prirodzené, že gradienty odvodené z mesačných alebo dlhodobějších úhrnov nemusia vystihovať reálnu situáciu pre každý časový interval výpočtu (denný, hodinový), ale detailnejšie časové rozlíšenie gradientov je prakticky možné len v prípade, že v oblasti existujú minimálne dve alebo viac zrážkomerných staníc s požadovaným krokom merania.

Vzťah množstva zrážok na nadmorskej výške analyzovali Kostka a Holko (1997). Z grafu závislosti ročných úhrnov zrážok na nadmorskej výške (obr. 1) za obdobie rokov 1989-1996 je zrejmé, že tento vzťah nie je lineárny v celom intervale nadmorských výšok. Pre experimentálne povodie Jaloveckého potoka je v intervale nadmorských výšok 700 - 1250 m n.m. vertikálny gradient ročného úhrnu zrážok asi 142 mm na 100 m a v intervale 1250 - 2200 m je takmer nulový (priemerný ročný úhrn zrážok nezávisí od nadmorskej výšky), alebo až záporný, s hodnotou - 8 mm/100 m. V snahe vyjadriť závislosť ročných úhrnov zrážok od nadmorskej výšky jednou funkciou pre potreby modelovania bol ako najlepšie vyhovujúci vybratý polynóm tretieho stupňa (obr. 1).

Konček et al. (1974) pri štúdiu zrážkových pomerov v oblasti Tatier zistili rozdelenie vertikálnych gradientov zrážok, ktoré je uvedené v tabuľke 1, pričom rozlišovali náveternú a zúveternú stranu svahov. Hodnoty nadmorskej výšky, pri ktorej dochádza k zmene hodnoty gradientu, určené analýzou, ktorú urobili Kostka a Holko (1997), a podľa Končeka et al. (1974) sú podobné.



Obr. 1 Závislosť ročného úhrnu zrážok na nadmorskej výške z meraní zrážok v totalizátoroch v povodí Jaloveckého potoka (obdobie 1989 - 1996) (horizontálna os - nadmorská výška, vertikálna os - úhrn zrážok v milimetroch, 1 - lineárny trend, 2 - trend polynómom tretieho stupňa)

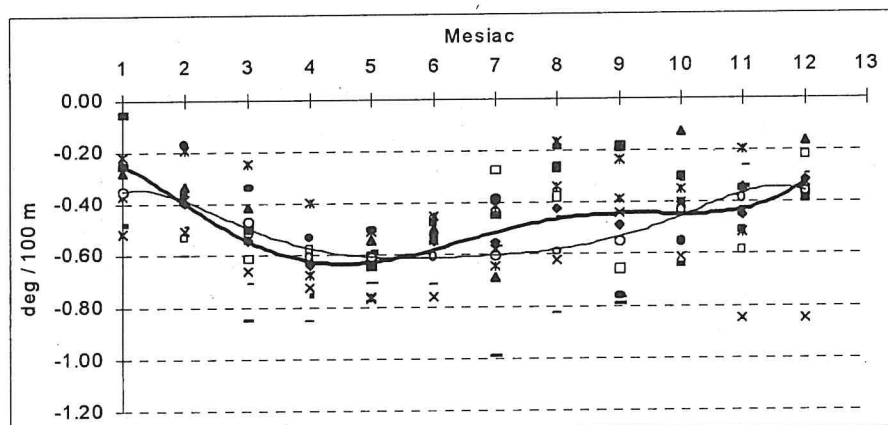
Obled (1990) uvádza, že použitie gradientov zrážok môže byť správne pre ročné alebo sezónne úhrny, ale gradienty zlyhávajú v prípade úhrnov zrážok za kratšie časové intervaly (do niekoľkých hodín). V prípade konvektívnych zrážok je možné skôr pozorovať najväčšie úhrny na úpätí alebo v strede svahov než v hrebeňových polohách. Toto platí predovšetkým pre náveterné svahy. Priestorové rozdelenie úhrnov zrážok na zúveterných svahoch je ešte komplikovanejšie.

Tab. 1 Priemerné gradienty ročných zrážkových úhrnov (mm/100 m) pre oblasť Tatier podľa výškových pásiem a expozície (Konček et al., 1974)

Nadmorská výška [m] Elevation	500-1000	1000-1300	>1300
SZ expozícia (náveterná) NW orientation (windward)	110	70	70
JV expozícia (zúveterná) SE orientation (leeward)	155	70	40

Denné hodnoty zrážkových úhrnov pre každý zo šiestich bodov v povodí sme určili rozpočítaním meračných mesačných úhrnov podľa denných údajov zo stanice Ondrašová ležiacej cca 9 km južne od záverečného profilu povodia.

Ďalším dôležitým vstupným údajom je teplota vzduchu s jej časovým a priestorovým rozdelením, ktorá sa v použitom modeli uplatňuje pri stanovení výparu z intercepcie, výparu z povrchu holej pôdy, pri určovaní skupenstva dopadajúcich zrážok (dážď-sneh), ako aj pri simulovaní akumulácie a topenia snehu. Na určovanie priestorového a časového rozdelenia teploty vzduchu v povodí sa taktiež dá použiť metóda extrapolácie teploty vzduchu z referenčnej stanice alebo viacerých staníc na základe výškového gradientu.



Obr. 2 Priemerné mesačné hodnoty vertikálnych gradientov teploty vzduchu z Jaloveckej doliny (hrubá čiara) a porovnanie s hodnotami z profilu Poprad - Lomnický štít podľa Končeka (1974) (tenká čiara)

Pre povodie Jaloveckého potoka použil Kostka (1998) na stanovenie gradientu a jeho zmeny v priebehu roka časové rady hodnôt teploty vzduchu nameraných na klimatických stanicích v nadmorských výškach 570, 800, 1100 a 1500 metrov. Priemerná ročná hodnota gradientu pre Jaloveckú dolinu vypočítaná z údajov za roky 1989-1996 bola -0.47 stupňa na 100 metrov, ale priemerné mesačné hodnoty gradientov sa výrazne líšili a ich rozptyl bol pomerne veľký, pričom vplyvom teplotných inverzií, typických pre horské oblasti najmä v jesenných a zimných obdobiach, dosahoval aj kladné hodnoty. Zmeny gradientu s časom v priebehu roka znázorňuje obr. 2. Trend priebehu priemerných mesačných hodnôt gradientu teploty bolo možné najlepšie vyjadriť polynómom piateho stupňa, ktorý spolu s digitálnym výškovým modelom umožnil pomerne jednoduché zadanie teploty ako distribuovaného vstupu modelu.

Údaje o slniečnom žiarení často chýbajú, ale tieto je možné pomerne jednoducho vypočítať aj podmienkach komplikovaného horského reliéfu, a to predovšetkým za jasného počasia. V prípade oblačného počasia však môže lokálne dochádzať k veľkým chybám vo výpočtoch. Príkladom modelu na výpočet príkonu slnečnej energie na horské povodie so započítaním zatienenia je model SOLEI (Meszároš, 1998). Pri simuláciách modelom WaSiM-ETH bol však použitý jednoduchší postup využívajúci faktor viditeľnosti oblohy. Okrem faktora viditeľnosti oblohy významne vstupuje do výpočtov index oblačnosti vyjadrujúci pomernú časť oblohy zatienenú mrakmi. V prípade, keď pozorovania oblačnosti ani merania slnečného žiarenia nie sú k dispozícii, je možné hodnotu indexu oblačnosti určiť nepriamo na základe denných miním a maxim teploty vzduchu (Kostka, 2000).

Reliéf terénu podstatne ovplyvňuje rozloženie vstupných údajov a parametrov, ako aj charakter prúdenia vody v povodí, ale nevyjadruje celkovú dynamiku hydrologických procesov v povodí. Ďalšími, veľmi dôležitými parametrami sú pôdne a vegetačné charakteristiky povodia, aj keď tieto sú taktiež výrazne určované reliéfom terénu (výšková zonálnosť). Vegetácia podstatne ovplyvňuje predovšetkým podiel zložiek aktuálnej evapotranspirácie - intercepcie a transpirácie, ale vzhľadom na rôzne spektrálne charakteristiky vegetačnej pokrývky (albedo) a rôznu hustotu (index listovej plochy) ovplyvňuje aj rozdelenie radiačnej bilancie a tým hodnoty intercepcie, transpirácie a výparu z pôdy. Významnými charakteristikami vegetácie, vstupujúcimi do výpočtov, sú albedo a index listovej plochy. Na stanovenie priestorového rozloženia vegetačných charakteristík je možné použiť údaje z lesných porastových máp, ktoré sa v našich podmienkach obnovujú každých desať rokov, alebo snímky diaľkového prieskumu Zeme.

Pri určovaní charakteristík pôdných pomerov sme vychádzali z vertikálnej zonálnosti pôd v Západných Karpatoch, výsledkov detailnejšieho výskumu Kňazovického (1970) a vlastných údajov. Z výskumov Kňazovického v Západných Tatrách so zameraním na Račkovu a Jamnickú dolinu vyplýva, že litozeme

sú pôdy hrebeňových zón vo výškach nad 1850 m n.m.. Rankre sa vyskytujú v mladších vývojových štádiách na osypových kužeľoch, v starších vývojových štádiách na silne skeletnom materiále. Sú to dvoj-horizontové pôdy s horizontmi H a C. Humusový horizont je výraznejšie vyvinutý v hĺbkach 25-35 cm a má znaky viac či menej intenzívneho procesu podzolizácie. Podzolové pôdy predstavujú pôdny typ s relatívne veľkým zastúpením v skúmanom území. Tieto pôdy predstavujú prvú súvislú zónu nad zónou kambizemí. Percentuálny obsah humusu v týchto pôdach je pomerne vysoký, ale majú vysoký obsah skeletu.

Klimatické scenáre

Pri simuláciách sme použili klimatické scenáre CCCMprep1999 a GISSprep2000 vypracované v rámci Národného klimatického programu (Lapin a Melo, 2000) vyjadrujúce zmeny mesačných hodnôt klimatických prvkov pre horizonty 2010, 2030 a 2075 (tabuľky 2 a 3). Teplotu vzduchu sme prepočítali podľa scenárov platných pre celé územie Slovenska, zrážkové úhrny podľa scenára pre stanicu Štrbské Pleso. Pretože denné scenáre neboli k dispozícii a použitý matematický model pracuje s denným krokom, pri prepočte vstupných údajov sme použili mesačné scenáre. Pri simuláciách sa tiež predpokladalo, že nedôjde k zmene využitia krajiny (vegetačného pokryvu), ani k zmenám fyziologických vlastností rastlín (napríklad k zvýšeniu odporu prieduchov).

Tab. 2 Scenáre zmien mesačných priemerov teploty vzduchu [$^{\circ}\text{C}$] v 50-ročných horizontoch pre celé Slovensko v porovnaní s normálom 1951-1980

Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
CCCMprep													
2010	0.5	0.7	0.9	0.7	0.4	0.6	0.9	1.0	1.0	0.9	0.6	0.4	0.7
2030	0.9	1.2	1.4	1.1	0.8	1.1	1.4	1.5	1.6	1.2	0.7	0.7	1.1
2075	2.2	2.9	2.8	2.3	2.3	2.9	3.4	3.6	3.6	3.0	2.0	1.8	2.7
GISSprep													
2010	0.3	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.6	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.5
2030	1.2	1.0	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.9	1.2	1.2	0.9
2075	2.7	2.4	2.3	2.2	1.9	1.8	2.1	2.4	2.3	2.3	2.6	2.8	2.3

Tab. 3 Kvocienty scenárov mesačných úhrnov zrážok pre Štrbské Pleso podľa CCCMprep k normálu 1951-1980. (M. Lapin a M. Melo, KMK MFF UK, 17.11.2000). Tieto scenáre boli pôvodne vypočítané pre porovnanie s obdobím 1901-1990 a prepočítané na 1951-1980

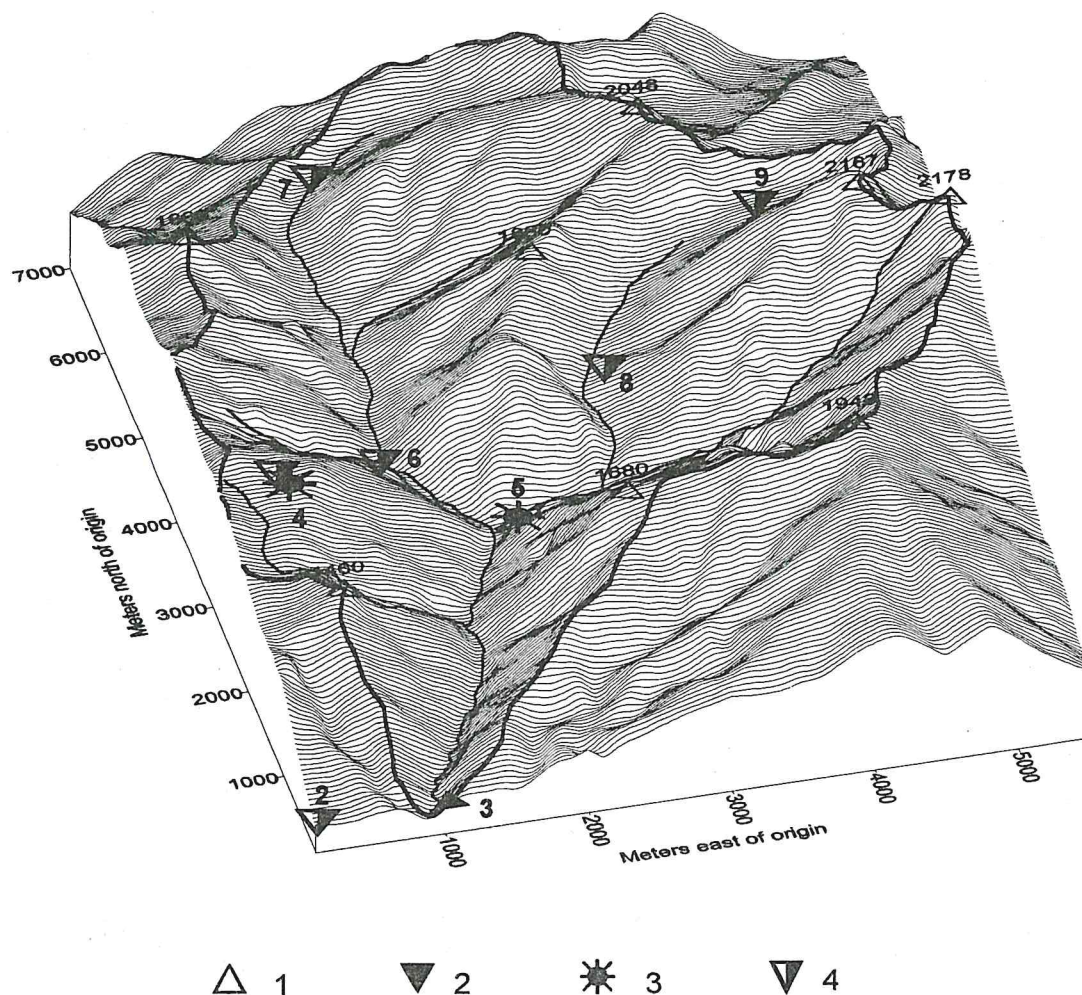
Horizont	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
CCCMprep													
2010	0.976	0.967	1.016	0.969	1.050	0.988	0.929	0.999	1.045	1.109	1.092	0.981	1.004
2030	1.003	0.992	1.052	1.026	1.094	0.996	0.925	0.999	1.052	1.131	1.132	1.012	1.026
2075	1.190	1.131	1.095	1.012	1.054	0.917	0.878	0.990	1.019	1.116	1.206	1.163	1.041
GISSprep													
2010	1.042	1.021	1.030	1.064	1.073	1.051	1.032	1.081	1.125	1.078	1.043	1.051	1.054
2030	1.017	1.055	1.077	1.075	1.082	1.074	1.049	1.088	1.148	1.117	1.052	1.015	1.067
2075	1.236	1.217	1.152	1.127	1.103	1.047	1.025	1.041	1.075	1.114	1.124	1.124	1.106

Klimatické scenáre uvádzajú odhad zmien vzhľadom na referenčné obdobie 1951-1980. Lapin et al. (1994) uvádzajú, že obdobie po roku 1980 je pravdepodobne ovplyvnené rastúcim skleníkovým efektom atmosféry a po analýze údajov z Hurbanova predpokladajú, že obdobie 1988-1993 by mohlo byť vzorkou klímy okolo roku 2015. Vzhľadom na to, že systematické merania v povodí Jaloveckého potoka za začali až po roku 1987, pri prepočte zrážok a odtoku podľa klimatických scenárov sme museli vychádzať z údajov z hydrologických rokov 1989-1999. To znamená, že výsledky sa nedajú interpretovať ako odhady pre časové horizonty 2010, 2030 a 2070, ale pre také obdobia, v ktorých budú priemerné mesačné zmeny vzhľadom na obdobie 1989-1999 blízke údajom z klimatických scenárov. Ako orientačné porovnanie uvádzame, že priemerný ročný úhrn zrážok pre povodie Jaloveckého potoka získaný interpretáciou publikovaných údajov (mapa izohyet) reprezentujúcich obdobie 1951-80 (Parajka, 1999) bol 1218 mm, zatiaľ čo priemerný ročný úhrn zrážok v období 1989-1999 kolísal v závislosti od interpolačnej metódy okolo 1500 mm. Analogické porovnanie sme urobili aj pre teplotu vzduchu. Priemerná ročná teplota vzduchu pre povodie Jaloveckého potoka získaná interpoláciou z mapy izoterm za roky 1951-1980 bola

2°C, priemerná ročná teplota vzduchu interpolovaná pre to isté povodie na základe údajov meraných v povodí v období 1989-1999 bola 3.3 °C.

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA MODELOVÉHO ÚZEMIA

Povodie Jaloveckého potoka v Západných Tatrách je predmetom hydrologického výskumu Ústavu hydrológie SAV od roku 1986 (obr. 3).



Obr. 3 Povodie Jaloveckého potoka s vyznačením meracích lokalít; (1 - kóty, 2 - limnigraf, 3 - automatické meteorologické stanice, 4 - totalizátory)

Geologicky je oblasť tvorená predovšetkým metamorfovanými horninami kryštalinika (ruly, migmatity), ktoré sa vyskytujú na 48% plochy povodia. Ďalšími zástupcami komplexu kryštalinika sú granodiority (21% plochy). Malá časť povodia (7%), predstavujúca hrebeňové časti na západe, je tvorená mezozoickými horninami (predovšetkým dolomity a vápence) križňanského a chočského príkrovu. Reliéf bol vymodelovaný predovšetkým činnosťou pleistocénnych ľadovcov, ktorej dôsledkom sú aj glaciofluviálne sedimenty, ktoré spolu a aluviálnymi náplavmi v údolných častiach predstavujú plochu 24% povodia.

Plocha povodia je 22.2 km². Priemerná výška povodia je 1500 m n.m., pričom najnižší bod má výšku 816 m n.m. a najvyšší 2178 m n.m.. Dôležitými charakteristikami povodia sú sklony a orientácia svahov. Priemerný sklon svahov v povodí je 30°. Takmer 20% svahov je orientovaných na juhovýchod, kým len 5% má severnú orientáciu.

Pôdy sú charakteristické vertikálnou zonálnosťou ovplyvnenou reliéfom, klímou a vegetáciou. Vertikálna zonálnosť pôd na silikátových horninách v Západných Karpatoch je charakteristická pravidelnou sériou: kambi-

zeme, podzol, rankre a litozeme. V oblastiach s mezozoickými karbonátovými horninami sa vyskytujú rendziny. V najvyšších polohách sa objavujú kamenisté pôdy (litozeme).

Detailné informácie o vegetačnej pokrývke v povodí Jaloveckého potoka boli prevzaté z porastových máp a z lesného hospodárskeho plánu z roku 1987. Najväčšiu plochu povodia pokrývajú lesy s prevahou smrek (44%). Kosodrevina pokrýva 31% plochy povodia a plocha lúk a holého povrchu (bralá) je 25 %.

VÝSLEDKY

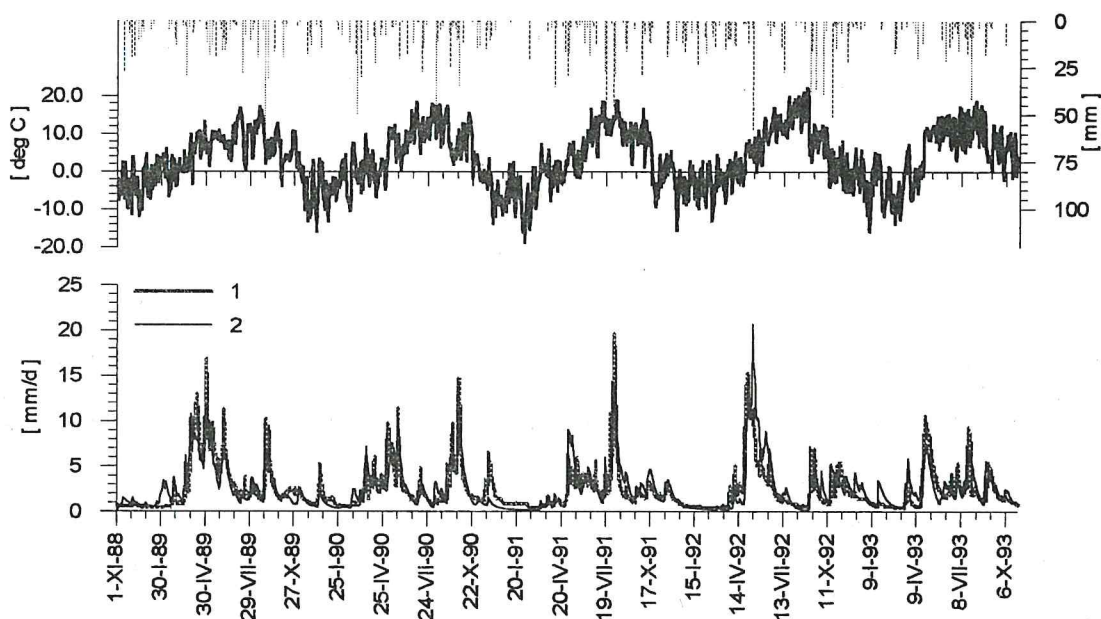
Kalibrácia a verifikácia modelu

Modelovaniu predchádzalo spracovanie a analýza existujúcich vstupných klimatických údajov (zrážky, teplota vzduchu, rýchlosť vetra, globálne žiarenie) a verifikačných hydrologických údajov (odtok z povodia, vlhkosť pôdy, vodná hodnota snehu) do hydrologického modelu WaSiM-ETH z povodia Jaloveckého potoka. Následne bol model kalibrovaný a verifikovaný s využitím dostupných údajov o odtoku z povodia a meraní vodnej hodnoty snehovej pokrývky.

Výsledky kalibrácie a verifikácie modelu WaSiM-ETH v povodí Jaloveckého potoka sú uvedené na obr. 4 a 5. Teploty vzduchu v grafoch predstavujú priemerné denné hodnoty pre celé povodie a zrážky sú vyjadrené ako denné úhrny pre celé povodie. Merané a simulované prietoky sa vzťahujú k záverečnému profilu (ústiu) povodia Jaloveckého potoka. Zhoda meraných a simulovaných hodnôt bola vyhodnotená pomocou koeficientu korelácie, pomocou Nash-Sutcliffovho kritéria (Nash-Sutcliffovo kritérium $E_{NS} = 0.572$, $R = 0.789$) a vyhodnotením rovnice hydrologickej bilancie.

Niektoré rozdiely medzi simulovanými a meranými prietokmi (napríklad začiatok decembra 1990 v kalibračnom období alebo marec 1994 počas verifikačného obdobia) môžu byť spôsobené rozdielmi odtoku zo snehu, ktoré sa dajú vysvetliť vplyvom topenia určeného interpolovanou teplotou vzduchu, ktorá sa môže líšiť od skutočnej v dôsledku inverzií v zimných mesiacoch. Niektoré simulované vlny v letných obdobiach sú podhodnotené. Toto môže byť spôsobené zrážkovými udalosťami z konvektívnej oblačnosti. Dá sa predpokladať, že hustota existujúcich zrážkomerných staníc nemôže vystihnúť priestorovú štruktúru búrkových zrážok, čo následne pri interpolácii meraných zrážok vedie k nereálnym hodnotám.

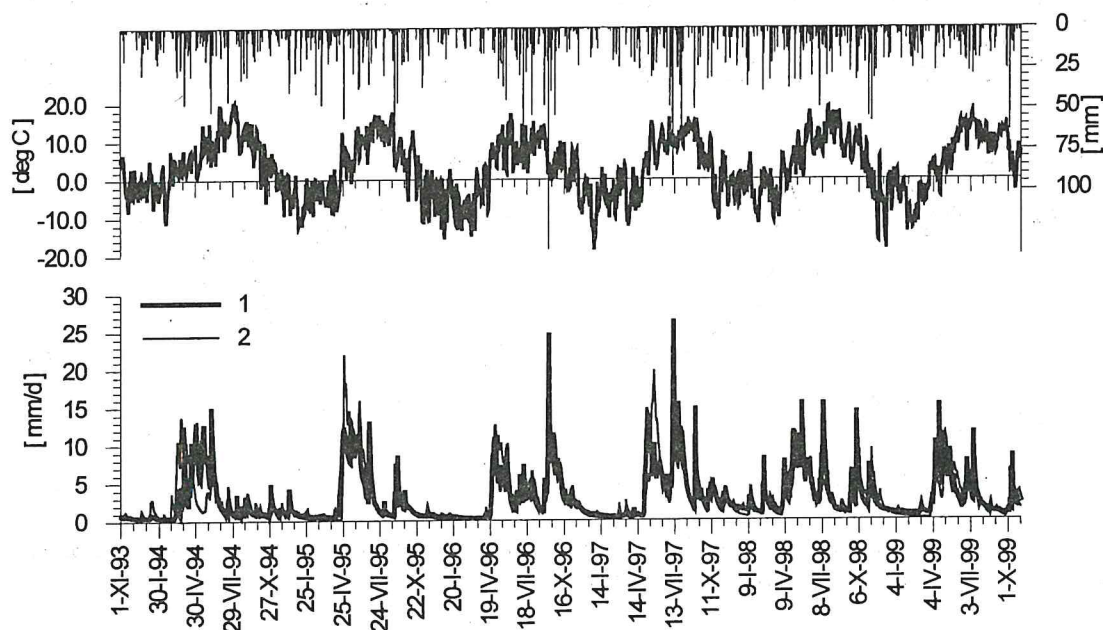
Simulácia celkovej vodnej bilancie bola veľmi dobrá-celkový simulovaný odtok za obdobie 1989-1999 predstavuje 99% meraného odtoku. Simulácia režimu odtoku počas roka bola tiež uspokojivá, pričom priemerný mesačný prietok v mesiacoch november-apríl (s výnimkou marca) bol simulovaný lepšie ako mesačné prietoky v júli až októbri.



Obr. 4 Porovnanie meraných prietokov (1) a prietokov simulovaných modelom WaSiM-ETH (2) pre kalibračné obdobie rokov 1989-93 (horná časť obrázku: priebeh zrážok a teploty vzduchu)

Verifikácia modelu bola vykonaná pre obdobie 1994-1999, pričom boli použité rovnaké parametre modelu ako v kalibračnom období (obr. 5).

Priemerný ročný úhrn aktuálnej evapotranspirácie (560 mm) vypočítanej pre obdobie rokov 1989-1999 v rámci kalibrácie a verifikácie je podobný s priemerným ročným rozdielom medzi zrážkami a odtokom (534 mm). Tomlain (1993) pre skúmané územie uvádza hodnotu ročnej aktuálnej evapotranspirácie asi 350 až 400 mm. Na základe regresných vzťahov, ktoré uvádzajú Parajka a Szolgay (1998) a ktoré vychádzajú z mapových analýz údajov na území Slovenska, vyplýva pre horskú časť povodia Jaloveckého potoka hodnota aktuálnej evapotranspirácie 457 mm. Miklánek (1995) vykonal analýzu rozdelenia hodnôt potenciálnej evapotranspirácie počas roka pre rôzne nadmorské výšky na základe údajov z viacerých staníc na Slovensku, pričom pre Štrbské pleso (1330 m n.m.), ktorého nadmorská výška a orientácia sú porovnateľné s povodím Jaloveckého potoka, z práce vyplýva ročný úhrn asi 570 mm. Vyššia hodnota je možná aj z hľadiska energetického príkonu. Toto potvrdzuje aj metóda empirického výpočtu potenciálnej evapotranspirácie na základe energetického príkonu slnečnej energie, ktorú odvodil Miklánek (1993). Použitím jeho vzťahu s energetickým príkonom korigovaným podľa reliéfu terénu podľa modelu WaSiM-ETH sme pre roky 1989-97 získali pre priemerný ročný úhrn potenciálnej evapotranspirácie hodnotu 992 mm.



Obr. 5 Porovnanie meraných prietokov (1) a prietokov simulovaných modelom WaSiM-ETH (2) pre verifikačné obdobie rokov 1994-99 (horná časť obrázku: priebeh zrážok a teploty vzduchu)

Modelované zmeny hydrologických prvkov spôsobené klimatickou zmenou

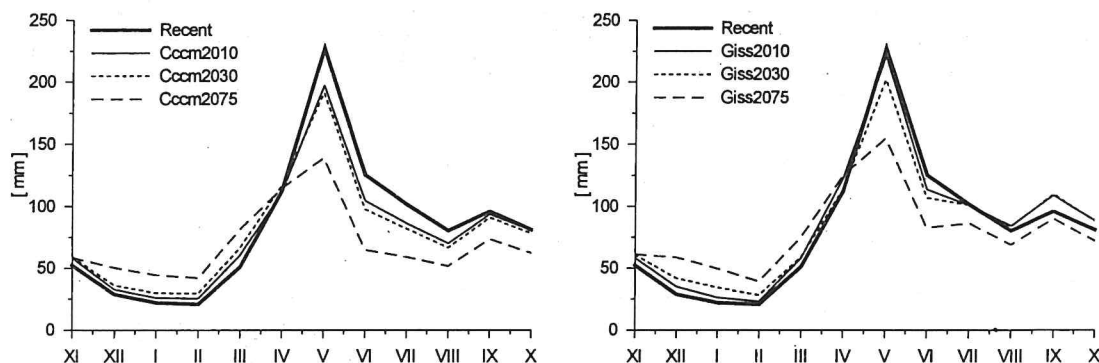
Celkový prehľad zmien vodnej bilancie vplyvom rôznych scenárov zmeny klímy je uvedený v tab. 4. Z tabuľky je zrejmé, že pri všetkých scenároch by malo dôjsť k zvýšeniu aktuálnej evapotranspirácie, a to o 8.7% až o 40.9%, pričom najmenší vzostup je pri scenári GISS2010 a najväčší pri CCCM2075. Zvýšenie ročných interpolovaných úhrnov zrážok v závislosti na jednotlivých scenároch klimatickej zmeny predstavuje +0.7% až +10.5% (priemerne o 4%), pričom v zimnom období je zvýšenie väčšie (priemerne o +7.3%) a v letnom období nižšie (priemerne len o 0.8%). Takýto sezónny charakter predpokladaného zvýšenia zrážkového úhrnu sa prejavuje aj na rozdelení simulovaného odtoku počas roka. Kombinácia mierneho zvýšenia ročných úhrnov zrážok s výraznejším vzostupom ročného úhrnu evapotranspirácie vedie k zníženiu odtokov o 3.5% až 15.7%, s výnimkou scenárov GISS2010 a GISS2030, kedy dochádza k miernemu zvýšeniu ročného odtoku o 3.2% až 4.2% v porovnaní so súčasnosťou.

V grafoch na obr. 6 a 7 sú porovnané mesačné odtoky simulované na základe súčasných radov meteorologických údajov z obdobia rokov 1989-1999 a na základe klimatických scenárov a percentuálne zmeny odtokov. Zo všetkých grafov je zrejma tendencia poklesu jarných a letných prietokov a vzostupu zimných prietokov. K tejto situácii dochádza následkom predpokladaného zníženia letných zrážok a zvýšenia

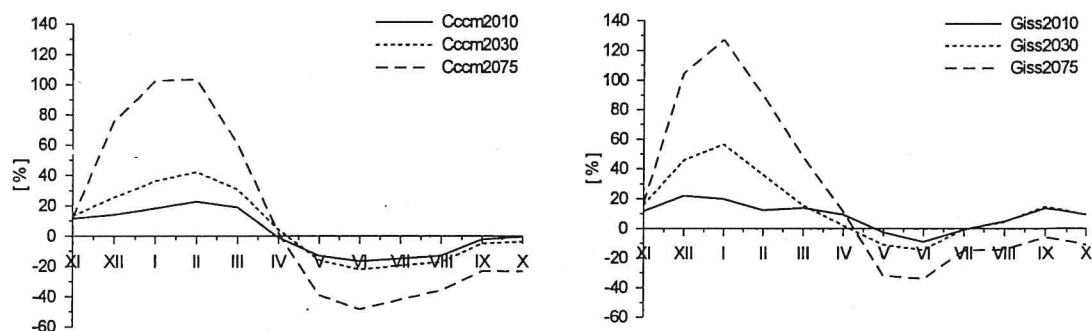
zimných zrážok v kombinácii so zvýšenou teplotou vzduchu, ktorá spôsobuje zvýšenie príspevku vody z topiaceho sa snehu v zimnom období a naopak vyššie straty vody evapotranspiráciou v letnom období (obr. 8 a 9).

Tab. 4 Zmeny priemerných ročných úhrnov prvkov vodnej bilancie vplyvom klimatickej zmeny podľa jednotlivých scenárov vzhľadom k priemerným hodnotám za obdobie rokov 1989-1999 (zrážky predstavujú priemernú hodnotu interpolovaných údajov pre celé povodie, bilancia je rozdiel medzi interpolovanými zrážkami a simulovaným odtokom, aktuálna evapotranspirácia je hodnota simulovaná modelom)

Scenár	Zrážky [mm]	Zmena zrážok [%]	Odtok [mm]	Zmena od- toku [%]	Bilancia (Z - O) [mm]	Aktuálna ET [mm]	Zmena akt. ET [%]
Scenario	Prec.	P change	Runoff	R change	Balance P-R	Actual ET	ET change
Súčasnosť	1558	-	998	-	560	562	-
CCCM2010	1569	+ 0.7	946	- 5.2	623	626	+ 11.4
CCCM2030	1605	+ 3.0	944	- 5.4	661	664	+ 18.1
CCCM2075	1625	+ 4.3	841	- 15.7	784	792	+ 40.9
GISS2010	1649	+ 5.8	1040	+ 4.2	609	611	+ 8.7
GISS2030	1672	+ 7.3	1030	+ 3.2	642	645	+ 14.8
GISS2075	1722	+ 10.5	963	- 3.5	759	764	+ 35.9



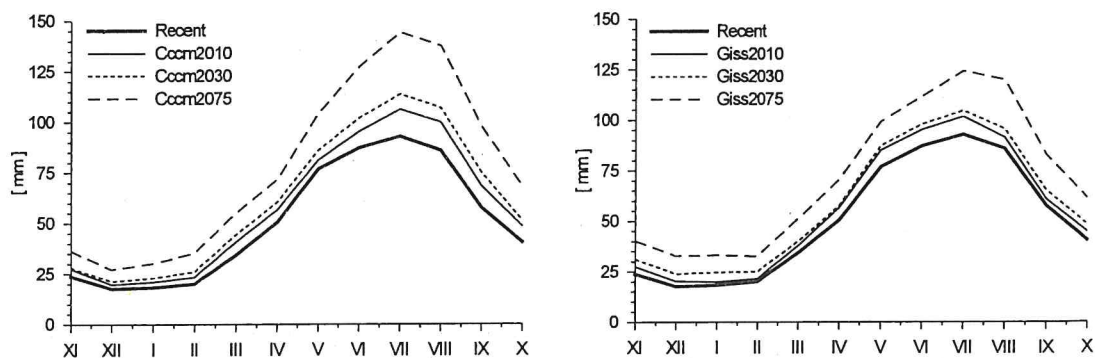
Obr. 6 Grafy mesačných odtokov simulovaných na základe klimatických scenárov a odtokov simulovaných na základe súčasných meteorologických údajov



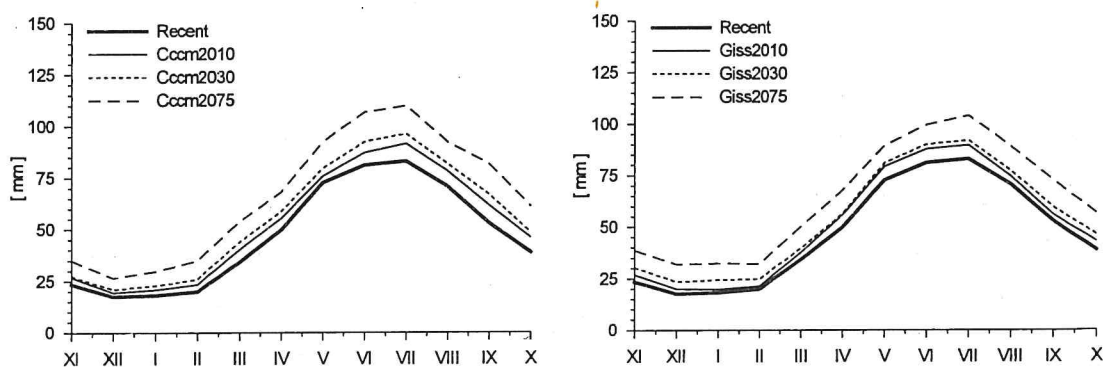
Obr. 7 Percentuálna zmena mesačných odtokov simulovaných na základe klimatických scenárov v pomere k odtokom simulovaným na základe súčasných meteorologických údajov

Vplyv zvýšenia teploty vzduchu sa výrazne prejavuje aj na simulovanej zmene vodnej hodnoty snehu (obr. 10 a 11). Jej pokles je spôsobený predovšetkým nižším podielom pevného skupenstva zrážok (menší podiel nového snehu a rýchlejšie topenie snehovej pokrývky vplyvom dažďa) a častejším alebo skorším nástupom teplôt nad limitnou teplotou topenia snehovej pokrývky. Najvýraznejší pokles vodnej hodnoty

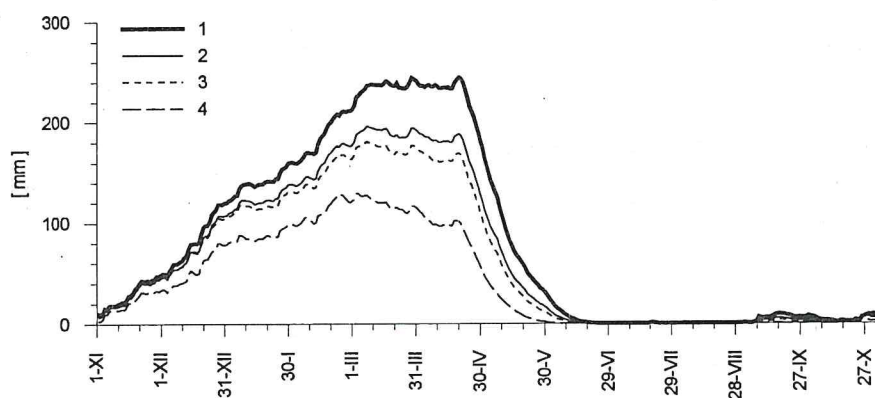
snehu sa prejavuje pri scenároch CCCM2075 a GISS2075, kedy simulovaná vodná hodnota snehu klesá v porovnaní so súčasnosťou takmer na polovicu.



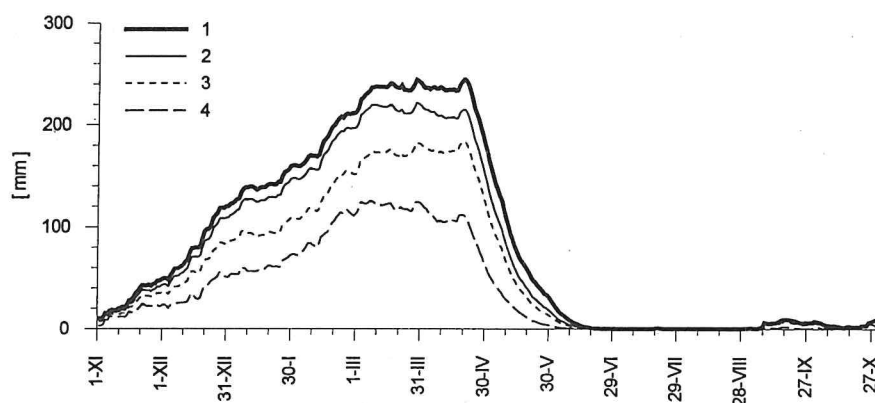
Obr. 8 Grafy mesačných úhrnov potenciálnej evapotranspirácie simulovaných na základe klimatických scenárov a simulovaných na základe súčasných meteorologických údajov



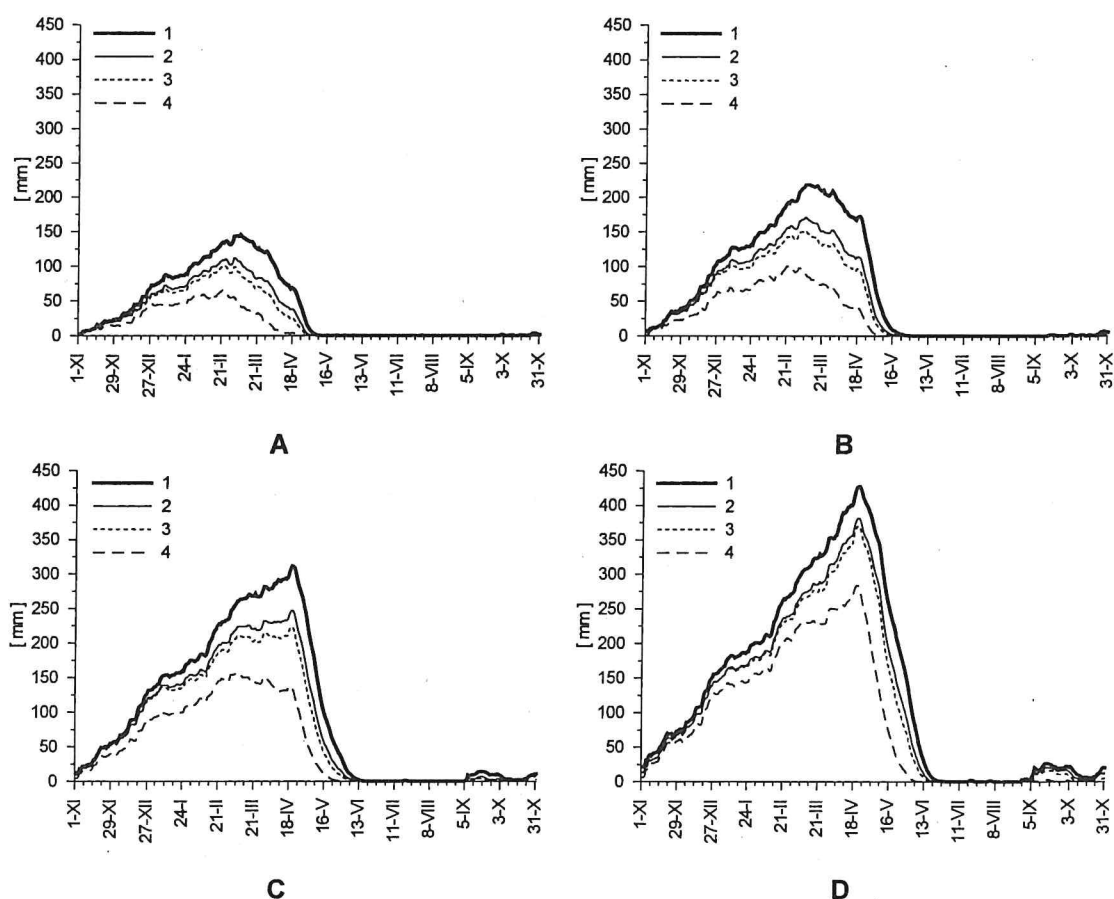
Obr. 9 Grafy mesačných úhrnov aktuálnej evapotranspirácie simulovaných na základe klimatických scenárov a simulovaných na základe súčasných meteorologických údajov



Obr. 10 Graf priemerných denných hodnôt vodnej hodnoty snehu simulovaných na základe súčasných údajov (1) a na základe klimatických scenárov CCCM2010 (2), CCCM 2030 (3) a CCCM 2075 (4)



Obr. 11 Graf priemerných denných hodnôt vodnej hodnoty snehu simulovaných na základe súčasných údajov (1) a na základe klimatických scenárov GISS2010 (2), GISS2030 (3) a GISS2075 (4)

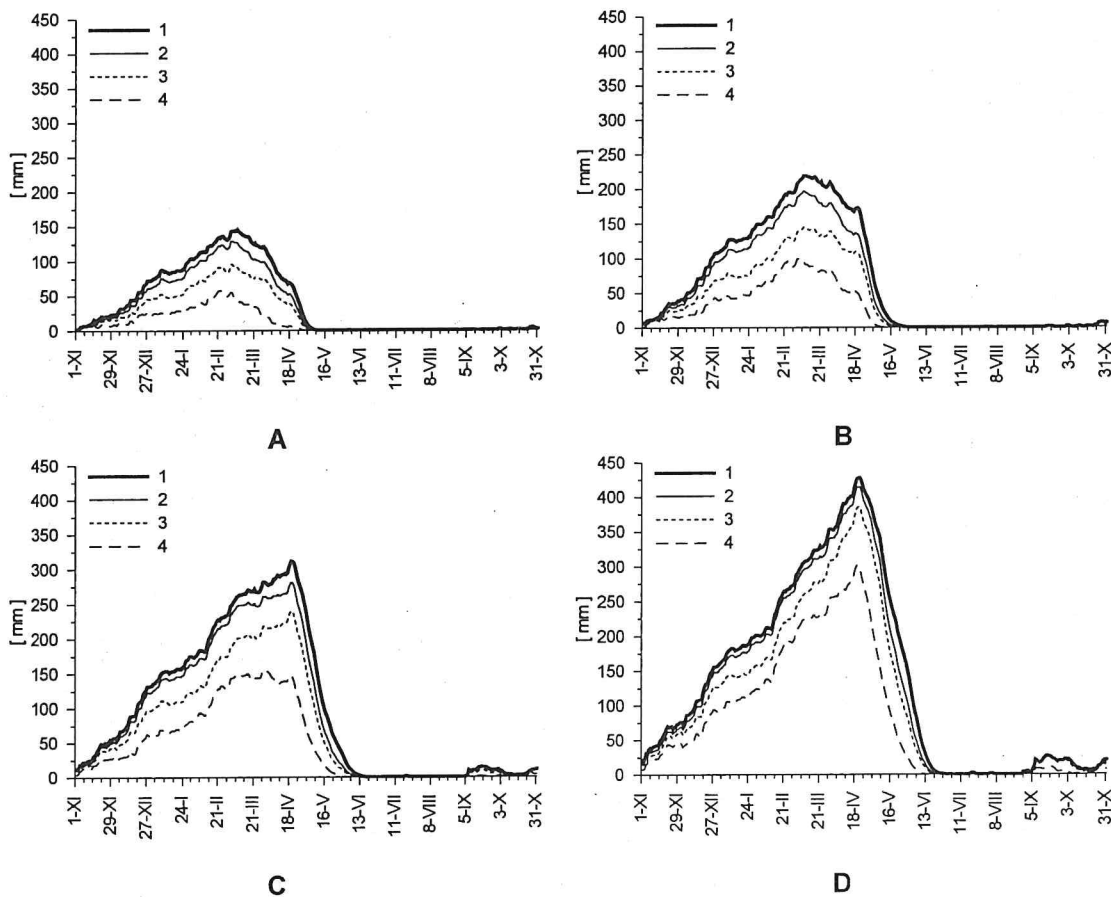


Obr. 12 Grafy priemerných denných hodnôt vodnej hodnoty snehu v jednotlivých výškových zónach (A: 800 - 1150 m n.m., B: 1150 - 1500 m n.m., C: 1500 - 1850 m n.m., D: 1850 - 2200 m n.m.) simulovanej na základe súčasných údajov (1) a na základe klimatických scenárov CCCM2010 (2), CCCM2030 (3) a CCCM2075 (4)

Dĺžka trvania snehovej pokrývky je ďalším parametrom, ktorý poukazuje na výrazný vplyv klimatickej zmeny. Zmeny trvania snehovej pokrývky veľmi závisia na posune priemernej teploty podľa príslušného scenára zmeny klímy. Pre štatistickú analýzu je vhodné vyjadriť trvanie snehovej pokrývky ako počet dní, v ktorých je prekročená daná hranica vodnej hodnoty snehu. V tab. 3 je vyjadrený vzťah medzi trvaním snehovej pokrývky presahujúcej 5 mm vodnej hodnoty snehu a nadmorskou výškou pri rôznych scenároch zmeny klímy. Kým v súčasnosti dĺžka trvania snehovej pokrývky (vodná hodnota snehu väčšia ako 5 mm,

tab. 5) kolíše v závislosti od výškového pásma, ktoré sledujeme, od 181 do 288 dní, v zmenených klimatických podmienkach kolíšu tie isté hodnoty od 156 do 214 dní. Podľa týchto kritérií by snehová pokrývka väčšinou trvala asi o mesiac kratšie. Pri iných kritériách sú rozdiely ešte dramatickejšie (tab. 6 a 7).

Vzhľadom na veľkú amplitúdu nadmorských výšok v skúmanom povodí (816 až 2178 m n.m.), a tým aj veľkej variabilite teploty vzduchu a zrážok, bolo potrebné pri analýzach zmien snehovej pokrývky rozčleniť povodie na výškové zóny, pričom tieto boli zvolené nasledovne: 800 - 1150 m, 1150 - 1500 m, 1500 - 1850 m a 1850 - 2200 m. Analýzy priemerných hodnôt simulovanej vodnej hodnoty snehu vo zvolených výškových zónach ukazujú, že vplyv zvýšenia teploty vzduchu sa najviac prejavuje v nižších oblastiach (obr. 12 a 13).



Obr. 13 Grafy priemerných denných hodnôt vodnej hodnoty snehu v jednotlivých výškových zónach (A: 800 - 1150 m n.m., B: 1150 - 1500 m n.m., C: 1500 - 1850 m n.m., D: 1850 - 2200 m n.m.) simulovanej na základe súčasných údajov (1) a na základe klimatických scenárov GISS2010 (2), GISS2030 (3) a GISS2075 (4)

Jednou z oblastí ľudských aktivít v horských oblastiach, ktorá je veľmi závislá na výške snehu a dĺžke jej trvania, je zimná turistika a lyžovanie. Podľa výskumu vykonaného v Alpách (Abegg, 1996) pre ekonomickú prevádzku lyžiarskych stredísk je počas zimnej sezóny potrebné, aby aspoň počas 100 dní trvala snehová pokrývka s adekvátnou výškou. Minimálna potrebná vodná hodnota snehu pre bežecké lyžovanie je asi 50 mm a pre zjazdové lyžovanie asi 100 mm. Začiatok, koniec a dĺžka trvania uvedených období sú pre zvolené výškové zóny a jednotlivé použité scenáre zmeny klímy uvedené v tab. 6 a 7. Termíny a dĺžky období naznačujú vhodnosť potenciálneho využitia a perspektívy jednotlivých stredísk zimných športov lokalizovaných v rôznych nadmorských výškach.

Tab. 5 Začiatok a koniec snehovej pokrývky v povodí a v jednotlivých jeho výškových zónach (výskyt priemernej vodnej hodnoty snehu vyššej ako 5 mm) a dĺžka trvania snehovej pokrývky (v dňoch) v súčasnosti a na základe scenárov klimatickej zmeny

Celé povodie – whole catcment													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	Zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
25.X	11.VI	25.X	6.VI	25.X	3.VI	4.XI	21.V	25.X	7.VI	25.X	5.VI	4.XI	25.V
230		225		222		199		226		224		203	
Zóna 800 až 1150 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	Zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
4.XI	3.V	5.XI	28.IV	4.XI	26.IV	6.XI	10.IV	6.XI	30.IV	6.XI	28.IV	6.XI	20.IV
181		175		174		156		176		174		166	
Zóna 1150 až 1500 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	Zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
25.X	18.V	4.XI	12.V	3.XI	9.V	4.XI	30.IV	1.XI	13.V	4.XI	11.V	4.XI	2.V
206		190		188		178		194		189		180	
Zóna 1500 až 1850 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	Zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
25.X	8.VI	25.X	3.VI	25.X	31.V	3.XI	19.V	25.X	4.VI	25.X	2.VI	3.XI	23.V
227		222		219		198		223		221		202	
Zóna 1850 až 2200 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	Zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
5.IX	19.VI	24.X	15.VI	25.X	12.VI	1.XI	2.VI	22.X	15.VI	22.X	14.VI	25.X	6.VI
288		235		231		214		237		236		225	

Tab. 6 Začiatok a koniec snehovej pokrývky v povodí a v jednotlivých jeho výškových zónach (výskyt priemernej vodnej hodnoty snehu vyššej ako 50 mm) a dĺžka trvania snehovej pokrývky (v dňoch) v súčasnosti a na základe scenárov klimatickej zmeny

Celé povodie - whole catcment													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
4.XII	21.V	5.XII	13.V	5.XII	11.V	18.XII	30.IV	6.XII	15.V	13.XII	12.V	26.XII	2.V
169		160		158		134		161		151		128	
Zóna 800 až 1150 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
19.XII	22.IV	24.XII	6.IV	24.XII	2.IV	25.I	3.III	24.XII	18.IV	18.I	6.IV	18.II	3.III
125		104		100		38		116		79		14	
Zóna 1150 až 1500 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
6.XII	4.V	11.XII	28.IV	12.XII	26.IV	23.XII	4.IV	12.XII	30.IV	20.XII	28.IV	25.I	12.IV
150		139		136		103		140		130		78	
Zóna 1500 až 1850 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
26.XI	24.V	28.XI	17.V	28.XI	13.V	12.XII	3.V	4.XII	18.V	9.XII	15.V	23.XII	5.V
180		171		167		143		166		158		134	
Zóna 1850 až 2200 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
16.XI	8.VI	18.XI	3.VI	18.XI	1.VI	20.XI	19.V	18.XI	4.VI	20.XI	2.VI	12.XII	22.V
205		198		196		181		199		195		162	

Z tab. 6 a 7 je zrejmé, že predovšetkým v nadmorských výškach do 1150 m dochádza k výraznému skráteniu zimnej lyžiarskej sezóny, a to už pri scenári CCCM2030 a GISS2030. Pri scenároch CCCM2075 a GISS2075 je toto skrátenie ešte výraznejšie. Možnosti zjazdového lyžovania by zanikali v zóne 800 až 1150 m n.m. už pri scenároch CCCM2010 a GISS2010 a v zóne 1150 až 1500 m n.m. už pri scenároch CCCM2030 a GISS2030 a pri scenároch CCCM2010 a GISS2010 by ich prevádzka, vzhľadom na uvedené kritériá, už bola neekonomická. Pomerne najmenej by sa skrátila sezóna v nadmorských výškach 1850 až 2200 m.

Tab. 7 Začiatok a koniec lyžiarskej sezóny a dĺžka jej trvania (v dňoch) v povodí a v jednotlivých jeho výškových zónach (výskyt priemernej vodnej hodnoty snehu vyššej ako 100 mm) v súčasnosti a na základe scenárov klimatickej zmeny

Celé povodie - whole catcment													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	Zač.	koniec
23.XII	10.V	25.XII	3.V	27.XII	30.IV	5.II	6.IV	25.XII	6.V	25.I	2.V	17.II	22.IV
139		130		125		61		133		98		65	
Zóna 800 až 1150 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
28.I	3.IV	17.II	8.III	-	-	-	-	6.II	24.III	-	-	-	-
66		20		0		0		47		0		0	
Zóna 1150 až 1500 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
25.XII	28.IV	4.I	21.IV	25.I	9.IV	-	-	3.I	24.IV	12.II	21.IV	-	-
125		108		75		0		112		69		0	
Zóna 1500 až 1850 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
20.XII	14.V	21.XII	8.V	23.XII	5.V	25.I	25.VI	21.XII	10.V	2.I	7.V	13.II	26.IV
146		139		134		91		141		126		73	
Zóna 1850 až 2200 m n.m. – elevation zone													
Súčasnosť		CCCM2010		CCCM2030		CCCM2075		GISS2010		GISS2030		GISS2075	
zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	Koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec	zač.	koniec
13.XII	2.VI	19.XII	28.V	19.XII	24.V	20.XII	11.V	18.XII	29.V	20.XII	25.V	6.I	13.V
172		161		157		143		163		157		128	

DISKUSIA

Výsledky simulácií v povodí Jaloveckého potoka poukazujú na výrazné zmeny hydrologického režimu spôsobené klimatickou zmenou. Na tomto mieste je však potrebné opäť upozorniť, že výsledky nemožno interpretovať ako zmeny, ktoré nastanú v časových horizontoch 2010, 2030 a 2035 (viď. časť Klimatické scenáre). Aby sa výsledky našej práce, ktorá vychádza z údajov meraných v rokoch 1989-1999 (nie v referenčnom období 1951-80) dali porovnávať s inými prácami venovanými obdobnej problematike, je potrebné bolo nutné použiť scenáre, ktoré by vyjadrovali zmenu klimatických prvkov pre dané časové horizonty vzhľadom na obdobie 1989-1999.

Hoci názory na to, či dôjde alebo už dokonca dochádza ku klimatickej zmene stále nie sú jednotné, zvyšovanie teploty vzduchu je skutočnosťou. Postup, ktorý sme použili v tejto práci je porovnateľný s postupmi v iných krajinách. Výhodou matematického modelu založeného na fyzikálnych vzťahoch medzi klimatickými prvkami a priebehom hydrologických procesov je, že by mal poskytovať reálne výsledky aj pre očakávané zmenené vstupné údaje. Z tohoto hľadiska ďalší vývoj v tejto oblasti zvisí najmä od ďalšieho upresňovania odhadov zmien klimatických prvkov pre jednotlivé časové horizonty.

V súvislosti so zmenou klímy sa často hovorí o pravdepodobnosti zvyšovania početnosti extrémnych hydrologických javov ako sú povodne a suchá. Takéto názory sú založené na logických úvahách. Klimatické scenáre predpokladajú mierne zvýšenie zrážkových úhrnov pri súčasnom zvýšení počtu bezoblač-

ných dní (Klementová, Blaha, 2000). Z toho sa dá usudzovať, že sa zvýši počet väčších zrážkových a teda aj odtokových udalostí. Zvyšovanie teploty vzduchu by logicky malo pri iba miernom zvýšení zrážkových úhrnov zvýšiť evapotranspiráciu a teda aj výskyt suchých období. Tieto úvahy však nemusia byť pravdivé. Okrem toho, že neuvažujú napríklad s možnými zmenami vo vegetačnej pokrývke, na ich overenie by bolo potrebné pracovať s dennými scenármi pre vstupné údaje – potom by na základe simulácií kalibrovaným fyzikálne založeným modelom bolo možné vyhodnotiť aj výskyt extrémnych hydrologických javov. Ak sa mesačné odhady z klimatických scenárov lineárne extrapolujú na existujúce denné vstupné údaje, rozdelenie charakteristík vstupných údajov sa nezmení. Získanie scenárov pre denné vstupné údaje by mohlo byť významným posunom v tejto oblasti.

Pri upresňovaní odhadov v budúcnosti bude tiež dôležité, ako dokážeme implementovať iné vplyvy, napríklad vplyv zmenenej vegetácie (Mind'áš a Škvarenina, 1996) alebo pôdnej pokrývky (Šály, 1996).

Vzhľadom na vplyv snehovej pokrývky na eko-hydrologické pomery v povodiach by bolo vhodné v budúcom období venovať väčšiu podrobnejšiu pozornosť aj problematike hydrológie snehu.

ZÁVER

V tejto práci sme použili fyzikálne založený distribuovaný matematický model WaSiM pracujúci s denným krokom na odhad zmien režimu odtoku a snehovej pokrývky v horskom povodí Jaloveckého potoka v Západných Tatrách vzhľadom na obdobie hydrologických rokov 1989-1999 s použitím scenárov CCCM a GISS.

Výsledky simulácií podľa všetkých scenárov naznačujú tendenciu posunu v hydrologickom režime horského povodia, ktorý sa prejavuje vyhladzovaním rozdielov v prietoku počas zimných a letných mesiacov. Vyššie teploty v zimnom období spôsobujú nižšiu akumuláciu vody v snehovej pokrývke, čo sa v kombinácii s väčším zvýšením zrážok v zimnom období prejavuje v uvedenom rozdiely vzostupu prietokov v zimnom a letnom období.

Významný vzostup teploty vzduchu predovšetkým podľa scenárov CCCM2075 a GISS2075 sa prejavuje najmä vo vzostupe potenciálnej evapotranspirácie. Relatívny vzostup potenciálnej evapotranspirácie je vyšší v zimných mesiacoch, ale vzhľadom na absolútne hodnoty je úhrnný vzostup v letnom období vyšší. Hodnoty simulovanej aktuálnej evapotranspirácie, ktoré použitom modeli predstavujú kombináciu výparu z povrchu pôdy, transpiráciu a výpar z intercepce, stúpnu na základe scenára CCCM2075 o 40.9% a na základe scenára GISS2075 o 35.9%.

Použité scenáre zmien mesačných priemerov teploty vzduchu, ale najmä mesačných úhrnov zrážok, neumožňujú vyhodnotenie zmien extrémnych hydrologických javov. Takéto analýzy by si vyžadovali scenáre s časovými radmi zrážok s detailnejším rozlíšením (aspoň denným), ktoré by lepšie vystihovali možné zrážkové udalosti s vysokou intenzitou alebo letné búrkové zrážky.

Reálnejšie predpovede zmien hydrologického režimu horských povodí by si okrem scenárov klimatickej zmeny vyžadovali scenáre pravdepodobnej zmeny štruktúry vegetácie a jej fyziologických vlastností, ktoré by mohli významne ovplyvniť hodnoty simulovanej evapotranspirácie.

Požiadavky na čo najreálnejšie predpovede odtoku z povodia, najmä v súvislosti s akumuláciou a topením snehu, si v komplikovaných horských podmienkach vyžadujú aj detailnejšiu štruktúru algoritmov použitých hydrologických modelov, pričom mimoriadne dôležitá je zmena primárneho rozdelenia snehu vplyvom transportu vetrom v kombinácii s tvarom reliéfu a so schopnosťou vegetácie zadržiavať sneh.

LITERATÚRA

- Abegg, B., 1996: Klimaänderungen und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in der Schweizer Alpen. Projektschlussbericht NFP31, Hochschulverlag an der ETH Zürich, 222 s.
- Anderson, E.A., 1973: National Weather Service river forecast system – snow accumulation and ablation model. NOAA, Tech.Mem., NWS-HYDRO-17, U.S. Dep. Of Commerce, Silver Spring, MD, 217 strán
- Čunderlík, J., Hlavčová, K., 2000: Nové hydrologické scenáre zmeny odtoku pre vybrané povodia stredného Slovenska. V. hydrologické dni – Nové podnety a vize pro příští století, Plzeň, s. 273-280
- Grabs, W., 1997: Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. Int. Com. for the Hydrology of the Rhine Basin (CRH), CHR report no. I-16, Lelystad, 172 strán
- Dyck, S., 1983: Angewandte Hydrologie. Teil 2- Vergleich für Bauwesen, Berlin, 544 strán

- Halmová, D., 1999: Dôsledky zmeny klímy v povodí Laborec-Humenné. VII. posterový deň s medzinárodnou účasťou, ÚH SAV Bratislava, 16.11.2000, ISBN 80-986480-0-3
- Halmová, D., 2000: Očakávané dôsledky klimatických zmien v oblasti vodného diela Orava. V. hydrologické dni – Nové podnety a vize pro příští století, Plzeň, s. 419-426
- Hlavčová, K., Lapin, M., 2000: Vplyv zmeny klímy na časové rady odtoku pre obdobie 2001-2090. VIII. posterový deň s medzinárodnou účasťou, ÚH SAV Bratislava, 16.11.2000, ISBN 80-986480-0-3
- Hosoda, M., Nogami, M., 2000: Snow precipitation amount and its sensitivity to global warming during winter season in Japan. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Jones, J.A., Post, D.A., Bond, B., 2000: Coupling of streamflow and vegetation water use at diurnal, storm, seasonal, and interannual time scales: the Andrews long-term ecological research site and comparisons with Coweeta, Hubbard Brook and Luquillo LTERs. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Klementová, E., Blaha, J., 2000: Zrážky-základný klimatický parameter prírodných pomerov Slovenska. VIII. posterový deň s medzinárodnou účasťou, ÚH SAV Bratislava, 16.11.2000, ISBN 80-986480-0-3
- Kňazovický, L., 1970: Západné Tatry. VEDA, Bratislava, 216 s.
- Konček, M. a kol., 1974: Klíma Tatier. VEDA, Bratislava, 856 s.
- Kostka, Z., 1998: Určovanie distribuovaných vstupov a parametrov hydrologického modelu v podmienkach horského povodia. Acta Hydrologica Slovaca, 1, s. 61-67.
- Kostka, Z., 2000: Metódy stanovenia indexu oblačnosti pre výpočty energie slnečného žiarenia. Acta Hydrologica Slovaca, 1, s. 33-40.
- Kostka, Z., Holko, L., 1997: Soil moisture and runoff generation in small mountain basin. National Report 1997 of the IHP UNESCO Project 1.1. FRIEND, 90 s.
- Kostka, Z., Holko, L., 1998: Estimation of hydrological balance components under variable conditions of mountainous catchments. In: Ecohydrology of High Mountain Areas (eds. Chalise S.R. et al.), Proc. of Int. Conf. on Ecohydrology of High Mountain Areas, Kathmandu, Nepal 24-28 March 1996, s. 265-273
- Lapin, M., Faško, P., Zeman, V., 1994: Príspevok k analýze možných dôsledkov globálneho oteplenia atmosféry o 1-2°C na zmeny klimatických pomerov na Slovensku. Národný klimatický program SR, zväzok 2, Bratislava, s. 35-77
- Lapin, M., Melo, M., 2000: Stručný prehľad scenárov klimatickej zmeny pre Slovensko. Katedra meteorológie a klimatológie MFF UK, Bratislava
- Lapp, S.L., Byrne, J.M., Sheppard, D.L., Johnson, R., 1999: Climate Warming Impacts on Snowpack Accumulation in Alpine Watersheds: A GIS Based Modeling Approach. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Meszároš, I., 1998: Modelovanie príkonu slnečnej energie na horské povodie. Acta Hydrologica Slovaca, 1, s. 68-75.
- Mind'áš, J., Škvarenina, J., 1996: Modelovanie dôsledkov klimatických zmien na lesné ekosystémy. Národný klimatický program SR, zväzok 5 Klimatické zmeny a lesy Slovenska. Bratislava, s. 29-40.
- Mikláněk, P., 1993: The application of a simple digital elevation model for the determination of areal evapotranspiration. Proc. Int. Conf., Braunschweig, Germany, IAHS Publ. No. 221, s. 103-108.
- Mikláněk, P., 1995: Ročné chody potenciálnej evapotranspirácie v rôznych nadmorských výškach. Vodohospodársky časopis, 43, 4-5, s. 275-287.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970: River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3).
- Obled, Ch., 1990: Hydrological modeling in regions of rugged relief. Hydrology in Mountainous Regions. I. - Hydrological Measurements; the Water Cycle, Proc. of two Lausanne Symposia, August 1990, IAHS Publ. no. 193, s. 599-613.
- Parajka, J., 1999: Mapping long-term mean annual precipitation in Slovakia using geostatistical procedures. Int. Conf. Problems in Fluid Mechanics and Hydrology, Inst. of Hydrodynamics Academy of Sciences of Czech Republic, Praha, 424-430
- Parajka, J., Szolgay, J., 1998: Grid-based mapping of the long-term mean annual potential and actual evapotranspiration in Slovakia. Proc. Conf. HeadWater'98, Merano, Italy, IAHS Publ. No. 248, s. 123-129.
- Pekárová, P., Szolgay, J., Mikláněk, P., 2000: Regionálne hydrologické scenáre vývoja režimu vôd. VIII. posterový deň s medzinárodnou účasťou, ÚH SAV Bratislava, 16.11.2000, ISBN 80-986480-0-3
- Petrovič, P., 1998: Climate Change Impact on Hydrological Regime for two Profiles in the Nitra River Basin. Zborník XIXth Conference of the Danube countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Osijek, paper no. 1.14., s. 117-122
- Pierce, L., Watson, F., Mulitsch, M., Newman, W., 1999: Interactions of Land Use and Global Environmental Change on Watershed-scale Hydrological and Ecological Processes. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Šály, R., 1996: Vplyv globálnych zmien klímy na lesné pôdy. Národný klimatický program SR, zväzok 5 Klimatické zmeny a lesy Slovenska. Bratislava, s. 41-45
- Schulla, J., 1997: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften, Heft 69, ETH Zürich, 161 s.

- Schulla, J., Jasper, K., 1999: Model Description WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model ETH). Institute of Geography ETH, Zürich, 166 s.
- Stanescu, V. Al., Simota, M., Corbus, C., Ungureanu, V., 1998: The Climate Change Impact on the Water Flow Regime in Romania. Zborník XIXth Conference of the Danube countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Osijek, paper no. 3.02., s. 321-330
- Singh, P., Kumar, N., 1997: Impact assessment of climate change on the hydrological response of a snow and glacier melt runoff dominated Himalayan river. Journal of Hydrology, vol. 193, issue 1-4, s. 316-350
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Parajka, J., Čunderlík, J., 1997: Vplyvy klimatickej zmeny na odtokový režim na Slovensku. Národný klimatický program Slovenskej republiky IV, zv. 6, s. 13-108
- Tomlain, M., 1993: Distribution of evapotranspiration on the territory of Slovakia. Evaporation, Water Balance and Deposition, Proc. of Symp. on Precipitation and Evaporation (eds. Becker, Sevruck, Lapin), Vol. 3, Bratislava, Slovakia, s. 181-184.
- Waichler, S., 2000: Simulation of Vegetation and Hydrology for Climate Change Analysis of a Mountain Watershed. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Yates, D., 1994: WatBal - An integrated water balance model for climate impact assessment of river basin runoff. IIASA WP-94-64

ABSTRACT

Z. Kostka and L. Holko, Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, Slovakia: Impact of climate change on runoff in a small mountain catchment.

In this report we investigated probable changes of hydrological regime of a small mountain catchment due to expected climate change. Distributed, physically based catchment model WaSiM run in daily-step mode was used to assess the objectives of the work. The model was calibrated with data from hydrological years 1989-1993 and its parametrization was verified against data (total catchment runoff and snow water equivalent) measured in hydrological years 1994-1999. Calibrated and verified model was then run with input precipitation and air temperature data adjusted according to CCCM and GISS climate scenarios (monthly) prepared for three time horizons. Simulated data were compared with data from reference period 1989-1999.

The simulations were performed for the mountain catchment of the Jalovecký creek, the Western Tatra Mountains, north Slovakia. Catchment area is 22.2 km², elevations ranges between 816 and 2178 m a.s.l. Gneiss and schist cover about 48% of catchment area, granodiorites cover 21% and Quarternary sediments 24%. The rest 7% of the catchment is made up by Mesozoic rocks dominated by limestone and dolomite. Average slope is 30° and most slopes has south-eastern orientation. Soil cover is represented by Cambisols, Podsol, Ranker and Lithosols. Forests dominated by spruce cover 44% of catchment area, dwarf pine covers 31% and alpine meadows and bare rocks cover the rest 25%. The catchment and observation network are shown in Fig. 3.

Simulated catchment runoff from the calibration and verification periods are shown in Figs. 4 and 5. Measured catchment runoff and snow water equivalent were reproduced acceptably. Overall water balance during simulation was very good (Table 4).

The simulations performed with input data adjusted according to climate scenarios clearly indicated changes in runoff and snow water equivalent changes. Table 2 presents basic water balance data and the changes due to climate change. The results indicate increase of actual evapotranspiration by 8.7-40.9% depending on scenario. Mean annual runoff should decrease by 3.5-15.7%. Spring and summer runoff should decrease while the winter runoff should increase (Figs. 6 and 7). Snow water equivalent will decrease. The maximum decrease was computed for CCCM2075 and GISS2075 scenarios where almost 50% decrease was indicated (Figs. 10 and 11). The most pronounced decrease is predicted for the lower areas (Figs. 12 and 13). Snow cover duration estimated from Table 5 should decrease at least by about one month. The results also indicate severe impacts of increased air temperature on the winter sports (Tables 6 and 7).

Further research should be based on the new scenarios for daily input data and take into account expected changes in vegetation characteristics. Snow cover needs special study aimed on improved modelling on snow drift which has major influence on distribution of snow cover in mountain catchments.

LIST OF FIGURES AND TABLES

Fig. 1 The relationship between annual precipitation in storage gauges (in mm, horizontal axis) and elevation (m a.s.l., vertical axis) in the Jalovecký creek catchment in hydrological years 1989-1996; 1 – linear trend, 2- 3rd order polynomial

Fig. 2 Mean monthly vertical gradients of air temperature measured in the Jalovecký creek catchment (thick line) and at profile Poprad- Lomnický peak calculated by Konček, 1974 (thin line)

Fig. 3 The Jalovecký creek catchment – relief and observation network (1-benchmarks, 2-water level recorder, 3-automatic weather stations, 4-storage gauges)

Fig. 4 Measured (1) and simulated (2) discharges during calibration period 1989-1993; the upper part of figure shows input precipitation and air temperature

Fig. 5 Measured (1) and simulated (2) discharges during verification period 1994-1999; the upper part of figure shows input precipitation and air temperature

Fig. 6 Monthly runoff simulated according to present conditions and climate scenarios

Fig. 7 Change in monthly runoff [%] simulated according climate scenarios with respect to present conditions

Fig. 8 Monthly totals of potential evapotranspiration [mm] simulated according present conditions and climate scenarios

Fig. 9 Monthly totals of actual evapotranspiration [mm] simulated according present conditions and climate scenarios

Fig. 10 Mean daily values of snow water equivalent [mm] simulated according present conditions (1) and climate scenarios CCCM2010 (2), CCCM 2030 (3) and CCCM 2075 (4)

Fig. 11 Mean daily values of snow water equivalent [mm] simulated according present conditions (1) and climate scenarios GISS2010 (2), GISS2030 (3) a GISS2075 (4)

Fig. 12 Mean daily values of snow water equivalent [mm] simulated for elevation zones 800-1150 m (A), 1150-1500 m (B), 1500 - 1850 m (C) and 1850 - 2200 m (D) simulated according present conditions (1) and climate scenarios CCCM2010 (2), CCCM 2030 (3) and CCCM 2075 (4)

Fig. 13 Mean daily values of snow water equivalent [mm] simulated for elevation zones 800-1150 m (A), 1150-1500 m (B), 1500 - 1850 m (C) and 1850 - 2200 m (D) simulated according present conditions (1) and climate scenarios GISS2010 (2), GISS2030 (3) and GISS2075 (4)

Table 1 Mean annual precipitation gradients [mm/100m] for the Tatra region with respect to elevation zones and orientation (Konček et al., 1974)

Table 2 Scenarios of monthly average air temperature changes [°C] in 50-year horizons for whole Slovakia compared to 1951-1980 normal

Table 3 Quotients of monthly precipitation total scenarios for Štrbské Pleso according to CCCMprep to 1951-1980 normal. (M. Lapin a M. Melo, KMK MFF UK, 17.11.2000). These scenarios were originally computed for comparison to 1901-1990 period and recalculated to 1951-1980

Table 4 Changes of mean annual totals of basic water balance components due to climate changes with respect to reference period 1989-1999

Table 5 Dates of first and last days with permanent snow cover (simulated snow water equivalent above 5 mm) in the whole catchment and partial elevation zones and snow cover duration [days] according present conditions and climate scenarios

Table 6 Dates of first and last days with permanent snow cover (simulated snow water equivalent above 50 mm) in the whole catchment and partial elevation zones and snow cover duration [days] according present conditions and climate scenarios

Table 7 Dates of first and last days with permanent snow cover (simulated snow water equivalent above 100 mm) in the whole catchment and partial elevation zones and snow cover duration [days] according present conditions and climate scenarios

REDAKČNÁ RADA

Predseda:

Ing. Ľubomír Žiak, MŽP SR

Členovia:

Doc. RNDr. Milan Lapin, CSc., KMK FMFI UK a SHMÚ

RNDr. Oľga Majerčáková, CSc., SHMÚ

Mgr. Irena Michlíková, SHMÚ

RNDr. Miroslav Ondráš, CSc., SHMÚ

RNDr. Pavel Šťastný, CSc., SHMÚ

Doc. RNDr. Dušan Závodský, CSc., SHMÚ a KMK FMFI UK

NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Zväzok 8

Vydáva:

Ministerstvo životného prostredia SR, Nám. Ľ. Štúra 1, 812 35 Bratislava

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Odborný redaktor: Doc. RNDr. Milan Lapin, CSc.

Tlač: GRAPHIC, tel.: 07 377 337, v roku 2000

Účelová publikácia, 110 s., náklad 400 výtlačkov

Všetky príspevky prešli odborným lektorovaním

Za jazykovú úroveň príspevkov zodpovedajú autori

ISBN 80 - 88907 - 07 - 1

