
GEOGRAFICKÝ ČASOPIS

57

2005

1

*Robert Danihlík, Milan Trizna**

VPLYV KLIMATICKEJ ZMENY NA REŽIM ODTOKU VO VYBRANÝCH POVODIACH SLOVENSKA

R. Danihlík, M. Trizna: The influence of climate change on the runoff regime in selected river basins in Slovakia. *Geografický časopis*, 57, 2005, 1, 17 figs., 3 tabs., 40 refs.

The study deals with the evaluation of the potential impact of a changed climate on the runoff regime in selected river basins in Slovakia. For the simulation of the runoff changes the monthly water balance model WatBal has been used. The model has been calibrated with data from the reference period 1951-1980. Consequently, based on climate change scenarios the possible changes in the distribution of the long-term mean monthly discharges within the year for the time horizons 2010, 2030 and 2075 were simulated. Two GCM scenarios of climate change CCCM and GISS were applied.

Key words: climate change, seasonal runoff distribution, climate change scenarios, hydrological scenarios

ÚVOD

Globálne zmeny klímy sa v súčasnosti spájajú najmä s výskytom rôznych anomálií počasia v porovnaní s dlhodobými priemernými hodnotami základných meteorologických prvkov. Priame dôsledky klimatickej zmeny (napr. zvýšenie priemernej ročnej teploty vzduchu a pod.) môže spôsobiť nielen zmenu podmienok pre prírodné ekosystémy, ale svojimi dôsledkami (napr. zmenou hydrologickej bilancie územia) zasiahnuť aj sociálne a ekonomické

* Katedra fyzickej geografie a geoekológie, PríF UK, Mlynská dolina 1, 842 15 Bratislava

sektory spoločnosti. Tento efekt zvyrazňuje aj geografická poloha Slovenska, zmena retenčnej schopnosti územia antropogénnymi zásahmi a pod.

Pre viaceré sektory (napr. poľnohospodárstvo, lesníctvo, ochrana životného prostredia) môžu mať sekundárne vplyvy spôsobené hydrologickými zmenami rovnaký, prípadne aj väčší význam ako vplyvy primárne, spôsobené klimatickou zmenou, a preto sa niekedy namiesto termínu klimatická zmena používa termín hydroklimatická zmena. Jej prejav sa môže na jednej strane objaviť zvýšeným výskytom suchých období, na strane druhej častejším výskytom búrok a lejakov, následne výskytom náhlych povodní, akými boli v nedávnej minulosti povodne v Strednej Európe.

GLOBALNE ZMENY KLÍMY A KLIMATICKÉ SCENÁRE

Klimatické scenáre nám poskytujú nielen informácie o možnom budúcom vývoji klímy, ale aj časové rady rôznych klimatických prvkov. Podľa Lapina et al. (2000) môžeme regionálnu interpretáciu scenárov zmeny klímy robiť na základe troch primárnych metód:

- z výstupov modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCM),
- metódou založenou na analýze analógov v historických radoch meteorologických pozorovaní,
- metódou tzv. prírastkových (inkrementálnych) scenárov.

Výstupy z modelov sú viazané na sieť „gridových“ bodov, ktorých vzdialenosť dosahuje niekoľko stupňov zemepisnej šírky a dĺžky a zväčša neležia na území Slovenska. Výstupy z týchto klimatických modelov sú preto modifikované pre naše územie. V predloženej práci bola použitá regionálna interpretácia starších aj najnovších výstupov GCM pre celé územie Slovenska podľa Lapina et al. (2000), a to CCCM a GISS. Sú to scenáre časových radov mesačných (prípadne aj denných) hodnôt klimatických prvkov, najmä teploty vzduchu a úhrnov zrážok. Pre modelovanie vnútroročného rozdelenia odtoku sme použili obidva uvedené scenáre.

Model CCCM vznikol roku 1989, ale výsledky pre územie Slovenska boli publikované až v roku 1995 (Lapin et al. 2000). Patrí k modelom so simuláciou jednorázového zvýšenia koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére na dvojnásobok. Model CCCMprep vznikol v roku 1997, ale výsledky pre územie Slovenska boli publikované v roku 2000. Je to prepojený model prvej generácie. Predpokladá postupný rast radiačne aktívnych plynov v atmosfére, zodpovedajúci pozorovaniam od roku 1850 do súčasnosti a rast o 1 % za rok až do roku 2100. Model tiež predpokladá priame účinky aerosólov prostredníctvom rastu albeda povrchu. Zdvojnásobenie koncentrácie radiačne aktívnych plynov v atmosfére je určené na obdobie medzi rokmi 1980 a 2050. Výstupy z modelu sú v tvare časových radov ročných, mesačných, v niektorých prípadoch aj denných hodnôt klimatických prvkov. Model CCCM veľmi dobre simuluje teplotu vzduchu, najmä v letnom a jesennom období, zimné hodnoty sú nadhodnotené. Pri zrážkach model CCCM vystihuje ročný chod, hodnoty sú však počas celého roka mierne nadhodnotené (Lapin et al. 2000).

Model GISS vznikol v roku 1982, ale výsledky pre územie Slovenska boli publikované roku 1995 (Lapin et al. 2000). Model GISSprep vznikol v roku

1998, ale výsledky pre územie Slovenska boli publikované v roku 2000. Je tiež prepojeným atmosféricko-oceánickým modelom. Má podobné parametre ako model CCCM z roku 1997, len výstupy sú v tvare desaťročných priemerov. Modely GISS simulujú nižšiu teplotu vzduchu v porovnaní so skutočnou, najmä v letnom a jesennom období. V ročnom chode zrážok na Slovensku model GISS pomerne dobre simuluje sezónny chod, avšak jednotlivé mesačné úhrny zrážok nadhodnocuje počas celého roka. Výskyt maxima zrážok je oproti skutočnosti posunutý na máj namiesto júna alebo júla (Lapin et al. 2000).

VÝBER POVODÍ

Výber povodí pre riešenie uvedenej problematiky bol podriadený nasledujúcim kritériám. Bolo potrebné mať k dispozícii úplný rad pozorovania z odporúčaného referenčného obdobia 1951-1980. Ďalším kritériom bol dostatočný počet klimatických staníc s jednotlivými charakteristikami, ktoré vstupujú do modelovania. Z hľadiska vhodných podkladov pre posúdenie priestorovej variability zmeny režimu odtoku sme vybrali také povodia, ktoré doteraz neboli riešené v rámci Národného klimatického programu alebo ako samostatné štúdie. Zároveň sme sa snažili vybrať také povodia, ktoré reprezentujú rôzne typy sezónneho rozdelenia odtoku (tab. 1) Na základe uvedených kritérií sme pri riešení predloženej práce nakoniec vybrali nasledujúce povodia: Hron po profil Banská Bystrica, Kysuca po profil Kysucké Nové Mesto, Torysa po profil Košické Olšany a Poprad po profil Chmeľnica. V tab. 1 sú uvedené základné hydrologické charakteristiky vybraných tokov.

Tab. 1. Základné hydrologické charakteristiky vybraných tokov

Tok	Stanica	Rozloha povodia (km ²)	Q_a (1931-80)	Oblasť a typ režimu odtoku (podľa Šima a Zátka 2002)
Hron	Banská Bystrica	1766,48	27,99	stredohorská – snehovo-dažďový
Kysuca	Kysucké Nové Mesto	955,09	16,55	stredohorská – snehovo-dažďový
Torysa	Košické Olšany	1298,30	8,02	vrchovinná-nížinná – dažďovo-snehový
Poprad	Chmeľnica	1262,41	16,28	vysokohorská – prechodne snehový

METODIKA HODNOTENIA VPLYVU KLIMATICKEJ ZMENY NA VNÚTROČNÉ ROZDELENIE ODTOKU

Problematica hodnotenia vplyvu klimatickej zmeny na odtok je spracovaná vo viacerých štúdiách domácich a zahraničných autorov. Hodnotením vplyvu klimatickej zmeny na odtok vody sa zaoberá Bálint et al. (1996), jeho regionálnou variabilitou Vogel et al. (1996) a Cooper et al. (1995), vplyv klimatických zmien na hydrologickú bilanciu sledoval Kaczmarek (1993), modelovaniu vplyvu klimatických zmien na vodné zdroje sa venoval Leavesley (1994). V domácej literatúre sú to najmä štúdie riešené v rámci Národného klimatického programu a Country study (napr. Trizna 1994, Szolgay et al. 1995, Švoboda 1996, Majerčáková a Šedík 1996, Szolgay et al. 1996, Hlavčová a Čunderlík 1998, Petrovič 2000, Hlavčová et al. 2002 a iní).

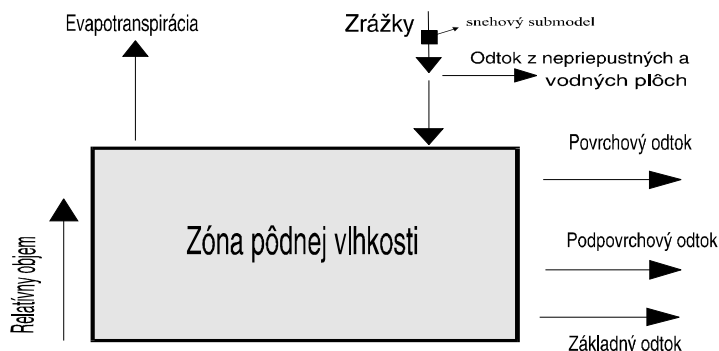
Na vytvorenie hydrologických scenárov zmien vnútroročného rozdelenia odtoku sme využili klimatické scenáre CCCM a GISS. Na základe skúseností z publikovaných prác (Čunderlík et al. 1998) sme aplikovali nasledujúci postup:

- vytvorenie referenčného modelovaného časového radu priemerných mesačných prietokov (1951-1980) a ostatných vstupných hodnôt (teplota vzduchu, zrážky, relatívna vlhkosť vzduchu, trvanie slnečného svitu),
- kalibrácia modelu WatBal,
- vytvorenie modelových časových radov vstupných hodnôt z obdobia 1951-1980 s použitím scenárov zmien klímy CCCM a GISS (staršie aj najnovšie). Pri vytváraní týchto radov vstupných hodnôt zrážok a teploty boli hodnoty referenčného modelovaného časového radu opravené v každom mesiaci o zmenu, ktorú udával príslušný scenár,
- vytvorenie modelovaného časového radu priemerných mesačných prietokov v modeli WatBal na základe modelových vstupných údajov a parametrov modelu z kalibrácie pre každý scenár,
- porovnanie rozdielov vo vnútroročnom chode odtoku podľa jednotlivých scenárov pre časové horizonty 2010, 2035 a 2075.

CHARAKTERISTIKA MODELU WATBAL

Na modelovanie odtoku z povodia s mesačným časovým krokom sme v práci použili matematický model vodnej bilancie WatBal, ktorý je špeciálnou implementáciou koncepčného modelu odtoku so sústredenými parametrami CLIRUNS (Yates 1994).

Model WatBal bol odporučený na modelovanie vplyvu klimatickej zmeny na vnútroročné rozdelenie odtoku Agentúrou pre životné prostredie (US EPA) v rámci projektu Country Study. Model WatBal je napísaný v jazyku Visual Basic a pracuje v prostredí Microsoft Excel. Základná schéma modelu je na obr. 1 (Čunderlík 2000). Povodie je v modeli zjednodušené na jednu nelineárnu nádrž. Model simuluje akumuláciu a topenie snehu, evapotranspiráciu, odtok z nepriepustných a vodných plôch, povrchový odtok, podpovrchový odtok a základný odtok.



Obr. 1. Konceptualizácia vodnej bilancie v modeli WatBal (Čunderlík 1996)

Výpočet vodnej bilancie

Základná diferenciálna rovnica vodnej bilancie použitá v modeli má nasledovný tvar:

$$S_{max} = [P(t) (1-\beta)] - R_s(z, t) - R_{ss}(z, t) - Ev(PET, z, t) - R_b,$$

kde S_{max} je maximálna zásobná kapacita povodia, z je relatívny objem vody v povodí ($0 \leq z \leq 1$), t je čas, P sú zrážky, β je koeficient vyjadrujúci aká časť zrážok dopadla na nepriepustné a vodné plochy v povodí ($0 \leq \beta \leq 1$), R_s je povrchový odtok, R_{ss} je podpovrchový odtok, Ev je evapotranspirácia, PET je potenciálna evapotranspirácia a R_b je základný odtok.

Vstupné údaje

Základné vstupné údaje potrebné na výpočet hydrologickej bilancie pomocou modelu v mesačnom časovom kroku sú zrážky, odtok a potenciálna evapo-transpirácia (ďalej PET).

V prípade, že chýbajú dáta o PET , model umožňuje jej výpočet metódou Priestlyho-Taylor. K tomu sú potrebné ešte nasledovné údaje:

- priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu,
- dlhodobé priemerné mesačné hodnoty trvania slnečného svitu,
- dlhodobé priemerné mesačné hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu.

Tab. 2. Klimatické stanice použité ako zdroj podkladových údajov

Tok	Stanica	Klimatické stanice a sledované parametre
Hron	Banská Bystrica	Banská Bystrica (t , rv , z), Brezno (t , ss , rv , z), Čierny Balog – Krám (z), Jasenie pred Suchou (z), Lubietová (z), Polomka (z), Staré Hory (z), Telgárt (t , ss , rv , z)
Kysuca	Kysucké Nové Mesto	Makov (z), Korňa (z), Turzovka (z), Čadca (t , rv , z), Stará Bystrica (z), Krásno nad Kysucou (z), Žilina (t , ss , rv , z)
Torysa	Košické Olšany	Brezovica nad Torsou (z), Lipany (z), Terňa (z), Kapušany (z), Prešov – Šarišské Lúky (t , rv , z), Kokošovce (z), Drieňov (z), Košice – Letisko (t , ss , rv , z)
Poprad	Chmeľnica	Relov (z), Poprad (t , ss , rv , z), Tatranská Lomnica (t , rv , z), Kežmarok (z), Ihľany – Majerka (z), Nižné Ružbachy (z), Chmeľnica (z)

Vysvetlivky:

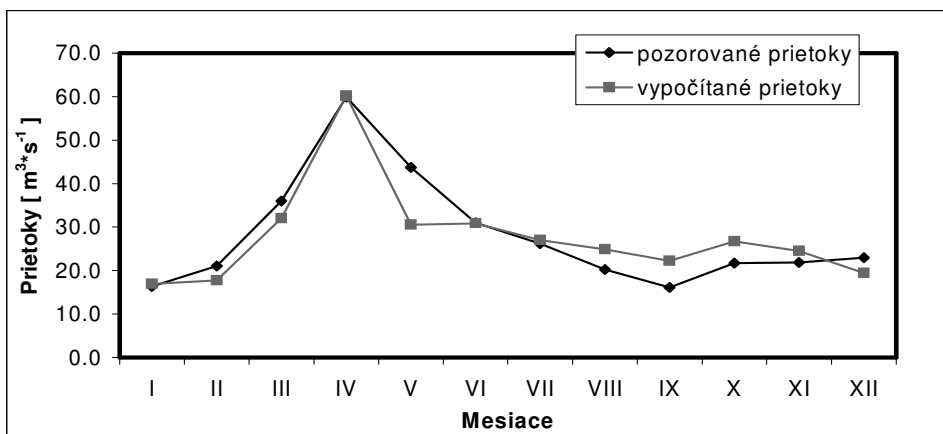
t – priemerná teplota, ss – slnečný svit, rv – relatívna vlhkosť, z – priemerný úhrn zrážok

Hodnoty odtoku vstupovali do modelu ako časový rad priemerných mesačných hodnôt prietoku vo vodomernom profile vybraného povodia. Pri určovaní priemerných mesačných zrážkových úhrnov na povodie sa vychádzalo z časových radov mesačných zrážkových úhrnov v zrážkomerných staniciach v danom povodí (tab. 2). Použili sme metódu Thiessenových polygónov, ktorá je založená na princípe váženého aritmetického priemeru. Hodnoty priemernej mesačnej teploty vzduchu z klimatických staníc daného povodia vstupovali do modelu ako rad priemerných mesačných hodnôt teploty vzduchu, vypočítaných ako aritmetický priemer priemernej mesačnej teploty vzduchu v príslušných

klimatických staniciach. Hodnoty relatívnej vlhkosti a slnečného svitu vstupovali do modelu ako dlhodobé mesačné priemery. Hodnoty na povodie boli určené tiež ako aritmetický priemer hodnôt v jednotlivých klimatických staniciach.

KALIBRÁCIA MODELU WATBAL

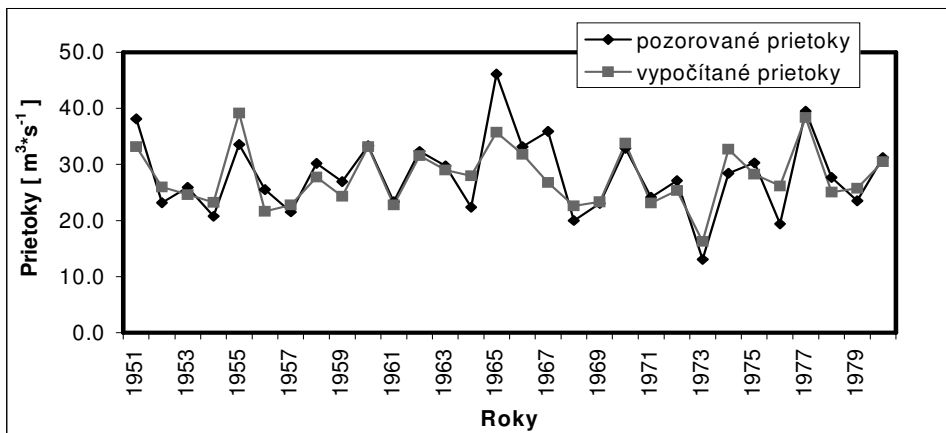
Model je kalibrovaný pomocou algoritmu, ktorý nachádza optimálnu kombináciu všetkých parametrov pri minimálnej hodnote strednej kvadratickej chyby medzi pozorovaným a modelovaným odtokom. Samotný proces kalibrácie, t. j. nájdenie najvhodnejších parametrov je náročný, pričom si vyžaduje trezivosť pri hľadaní optima medzi pozorovanými a vypočítanými, resp. modelovanými hodnotami prietoku. Model WatBal bol kalibrovaný na referenčné obdobie 1951-1980, ktoré bolo považované za reprezentatívne obdobie pre rozdelenie odtoku v roku. Pre cieľ tejto práce sme sa najmä zamerali na režim odtoku počas roka.



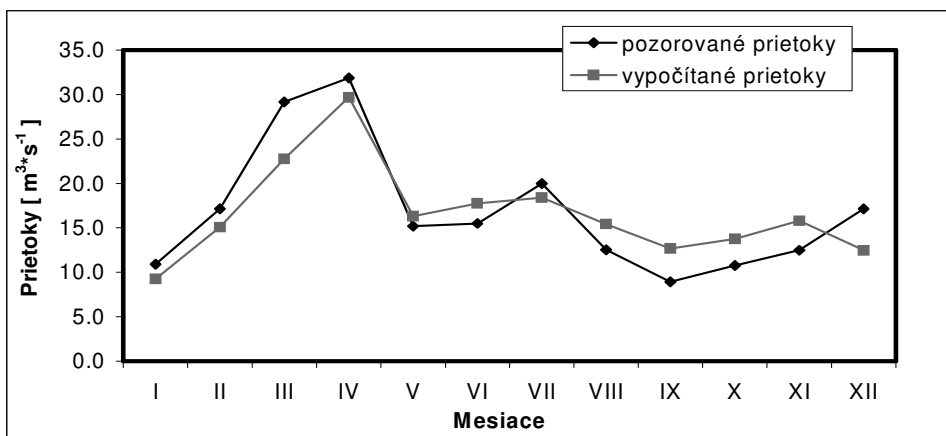
Obr. 2. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných dlhodobých priemerných mesačných prietokov za obdobie 1951-1980 na Hrone v stanici Banská Bystrica

Výsledky kalibrácie modelu v povodí Hrona po Banskú Bystricu sú v grafickej podobe uvedené na obr. 2, ktorý zobrazuje porovnanie vypočítaných a pozorovaných dlhodobých priemerných mesačných prietokov za obdobie 1951-1980. Vo vnútroročnom chode sa nám podarilo primerane namodelovať celé obdobie, okrem jedného mesiaca (máj). Príčin môže byť viac, jednou z nich môžu byť chyby vstupných hodnôt, závažný problém je aj v rozmiestnení staníc v povodí. Obr. 3 reprezentuje porovnanie vypočítaných a pozorovaných priemerných ročných prietokov za obdobie 1951-1980. V tomto prípade sme dosiahli výbornú zhodu za celé porovnávané obdobie.

Pre povodie Kysuce po Kysucké Nové Mesto simulácia vypočítaných a pozorovaných dlhodobých mesačných prietokov za obdobie 1951-1980 nie je v úplnej zhode. Od decembra po apríl model podhodnocuje prietok oproti pozorovanému a od mája po november (okrem júla) naopak nadhodnocuje prietok.



Obr. 3. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných priemerných ročných prietokov za obdobie 1951-1980 na Hrone v stanici Banská Bystrica

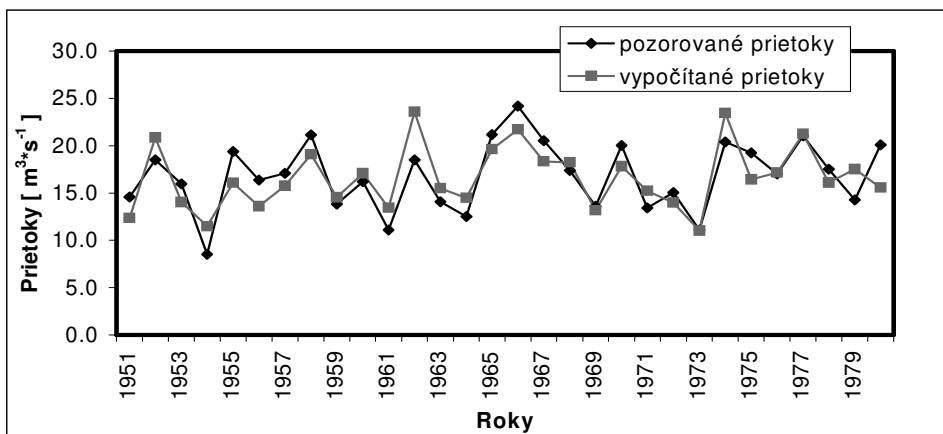


Obr. 4. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných dlhodobých priemerných mesačných prietokov za obdobie 1951-1980 na Kysuci v stanici Kysucké Nové Mesto

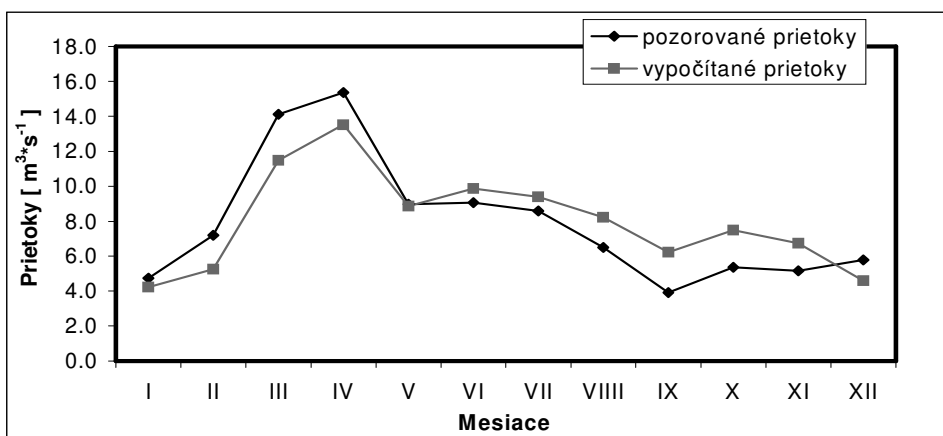
Model dokázal zachytiť režim odtoku počas roka, ale domnievame sa, že z dôvodu zložitejšieho ročného chodu povrchového odtoku, ktorý je charakteristický pre rieky flyšových oblastí (malá akumulčná schopnosť povodia), nie sú výsledky v úplnej zhode. Považujeme ich však za uspokojivé. Horšie výsledky zimných mesiacov môžu byť spojené so snehovým submodelom. Výsledky sú uvedené na obr. 4. Pri priemerných ročných prietokoch, môžeme skonštatovať, že výsledky simulácie sú v dobrej zhode s pozorovaným obdobím (obr. 5).

Aj na povodí Torysy je model WatBal schopný zachytiť ročný chod odtoku, ale výsledky v porovnaní s ostatnými povodiami sú najhoršie. Od decembra po apríl model podhodnocuje dlhodobý priemerný mesačný prietok oproti pozorovanému a od júna po november, naopak, nadhodnocuje prietok.

Výsledky sú uvedené v prílohe na obr. 6. Pri priemerných ročných prietokoch je situácia analogická (obr. 7). Ani pri opakovaných kalibráciách sa nám nepodarilo dosiahnuť lepšiu zhodu vnútroročného a ročného chodu prietokov. Pri tomto povodí sa nám model javil ako nepružný pri zmene parametrov pre kalibráciu.

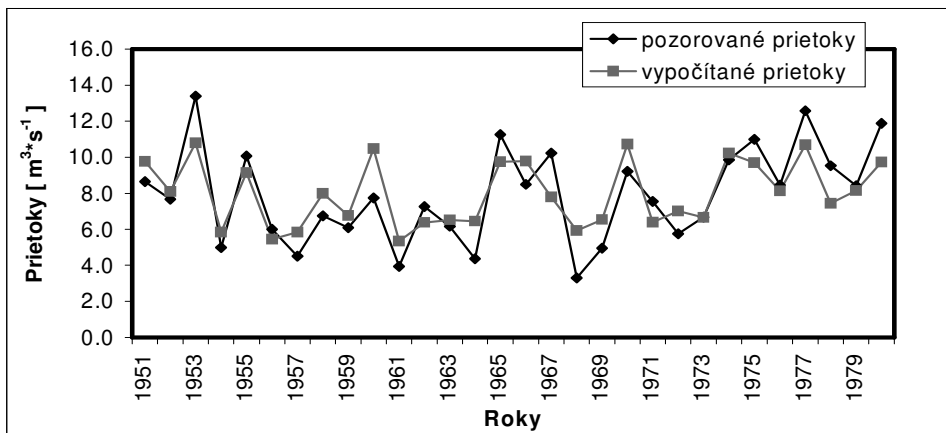


Obr. 5. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných priemerných ročných prietokov za obdobie 1951-1980 na Kysuci v stanici Kysucké Nové Mesto

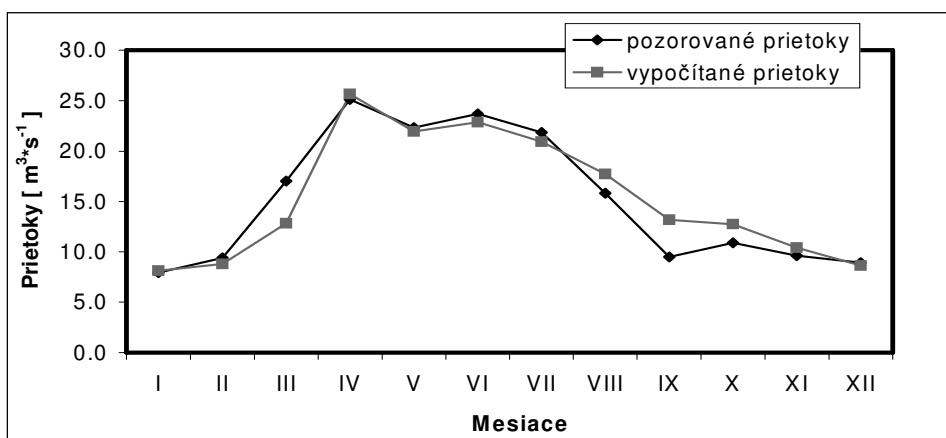


Obr. 6. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných dlhodobých priemerných mesačných prietokov za obdobie 1951-1980 na Toryse v stanici Košické Olšany

Pre povodie Poprad je simulácia pozorovaného prietoku v dobrej zhode s pozorovanými prietokmi. Mesiac marec model oproti pozorovanému prietoku podhodnocuje a mesiac september nadhodnocuje. Výsledky sú uvedené na obr. 8. Pri priemerných ročných prietokoch môžeme skonštatovať, že výsledky simulácie sú v dobrej zhode s pozorovaným obdobím (obr. 9), s výnimkou extrémnych hodnôt prietokov (napr. obdobie 1962-1965).



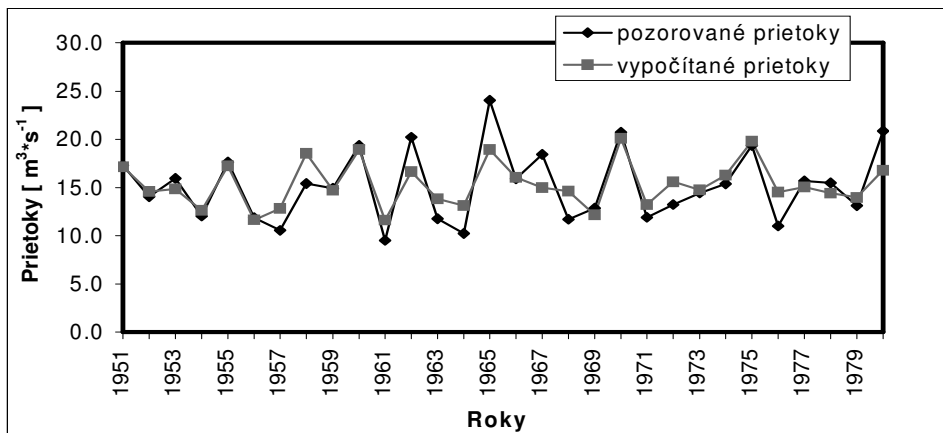
Obr. 7. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných priemerných ročných prietokov za obdobie 1951-1980 na Toryse v stanici Košické Olšany



Obr. 8. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných dlhodobých priemerných mesačných prietokov za obdobie 1951-1980 na Poprade v stanici Chmeľnica

Tab. 3. Hodnoty koeficientov korelácie pre vybrané povodia

Povodie	Profil	r_{mes}	r_{rok}
Hron	Banská Bystrica	0,915	0,833
Kysuca	Kysucké Nové Mesto	0,894	0,776
Torysa	Košické Olšany	0,888	0,834
Poprad	Chmeľnica	0,956	0,834



Obr. 9. Porovnanie vypočítaných a pozorovaných priemerných ročných prietokov za obdobie 1951-1980 na Poprade v stanici Chmeľnica

V tab. 3 uvádzame hodnoty koeficientu korelácie medzi pozorovanými a vypočítanými dlhodobými priemernými mesačnými prietokmi, ako aj pre priemerné ročné prietoky pre všetky vybrané povodia. Z tabuľky vyplýva, že dosiahnuté výsledky koeficientu korelácie v prípade mesačných prietokov pre povodia Hron a Poprad ukazujú na veľmi tesný vzťah medzi pozorovanými a vypočítanými hodnotami prietoku. Aj povodia Torysa a Kysuca dosiahli vysoké hodnoty korelácie. Hodnoty koeficientov korelácie ročných prietokov za obdobie 1951-1980 sa pohybujú od 0,776 po 0,834 a hodnotíme ich ako uspokojivé.

HYDROLOGICKÉ SCENÁRE ZMENY REŽIMU ODTOKU VYBRANÝCH TOKOV

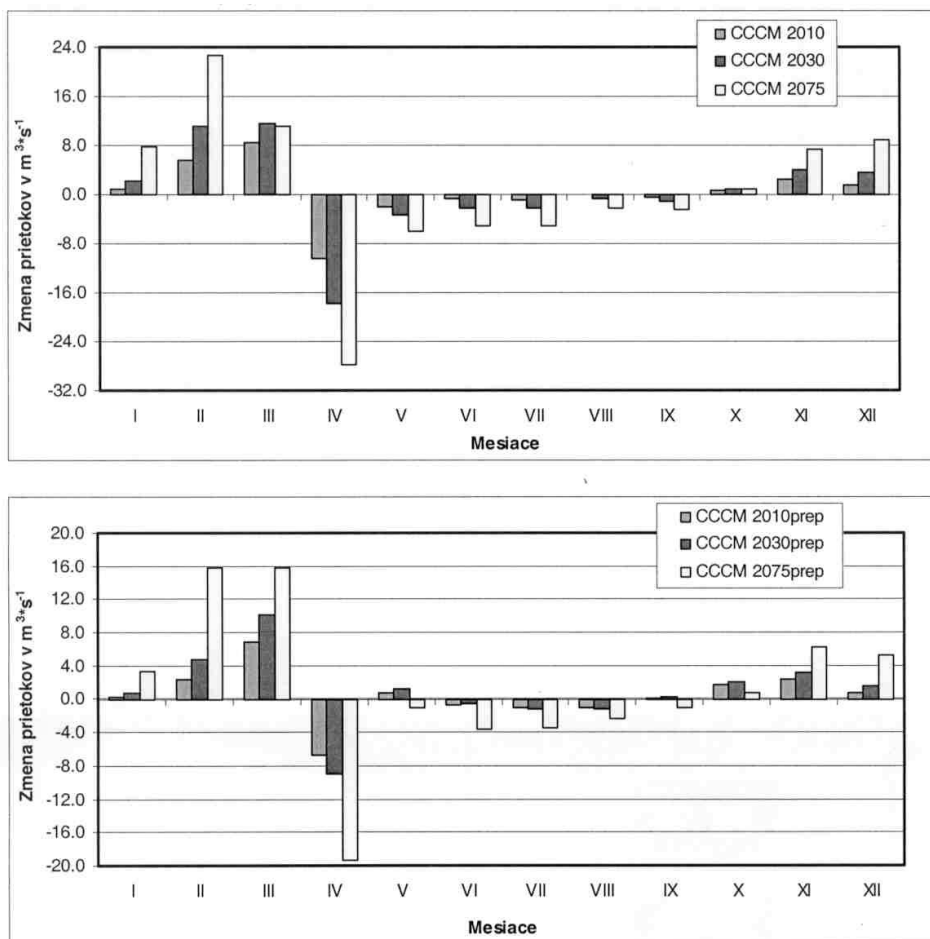
Na základe klimatických scenárov boli určené možné zmeny vnútroročného rozdelenia odtoku oproti referenčnému obdobiu (1951-1980) pre časové horizonty 2010, 2035 a 2075.

Pri vzájomnom porovnávaní zmien mesačnej vodnosti v povodí Hrona po Banskú Bystricu pre oba scenáre CCCM môžeme konštatovať, že majú podobný priebeh vnútroročných zmien odtoku. Keďže model CCCMprep je pri scenároch zmien mesačných priemerov teploty vzduchu miernejší, pokles alebo nárast vodnosti vo všetkých mesiacoch je oproti staršiemu modelu tiež miernejší. Pri scenároch zmien mesačných úhrnov zrážok môže mať výrazný vplyv na rozdelenie odtoku počas roka aj obdobie predpokladaného poklesu zrážok pri staršom scenári v mesiacoch máj až september a pri CCCMprep jún – august. V zostávajúcich mesiacoch predpokladáme nárast zrážok.

Nárast prietokov predpokladáme v mesiacoch október až marec. So vzdáľovaním sa časového horizontu môže predpokladaný nárast dosiahnuť pri staršom scenári v mesiaci február až 23 m³/s, pri CCCMprep 19 m³/s. V období od apríla po september môžeme rátať s poklesom vodnosti, pričom najvýraznejší pokles je v apríli pri časovom horizonte 2075 (do 28 m³/s pri

scenári CCCM) a pri scenári CCCMprep je tento pokles menší (do $20 \text{ m}^3/\text{s}$). V ostatných mesiacoch dosahuje hodnotu do $6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mesiace august až október sú pre nás zaujímavé tým, že sa pri nich nepredpokladá nijaký výrazný pokles ani nárast vodnosti pre všetky časové horizonty pri oboch scenároch. Tieto zmeny dosahujú hodnoty do $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Výsledky simulácií pre povodie Hrona pre scenáre CCCM a CCCMprep sú prezentované na obr. 10 a vyjadrujú zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov.

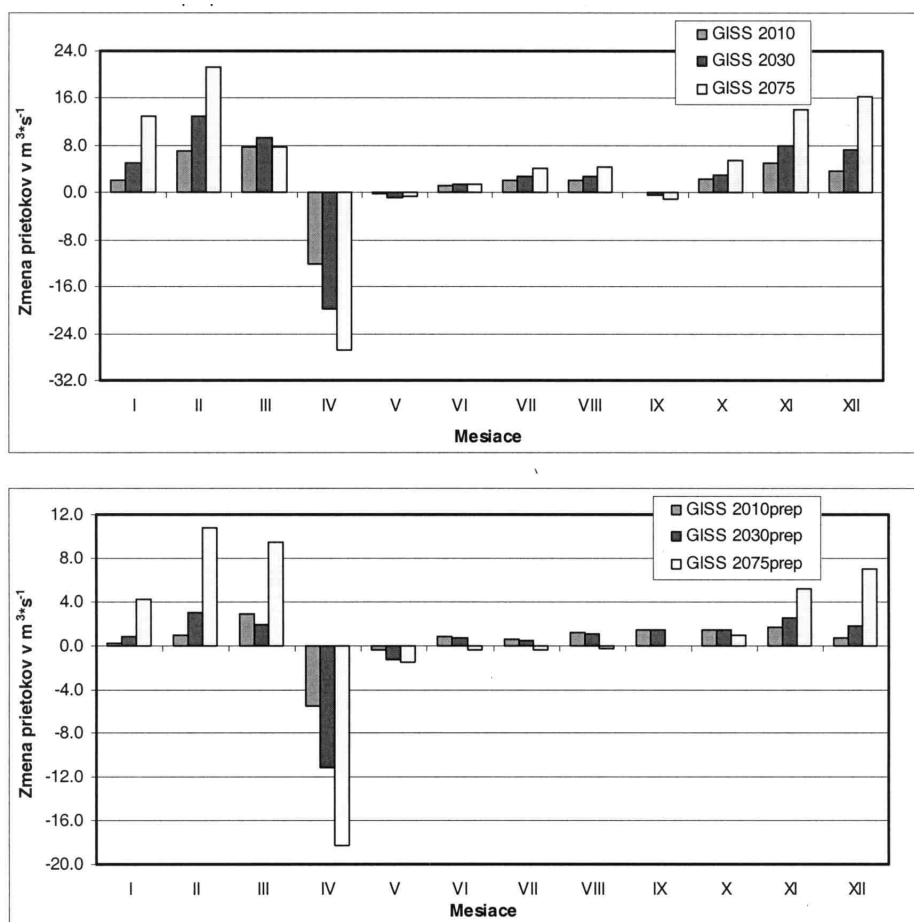


Obr. 10. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Hrone v stanici Banská Bystrica pre scenáre CCCM a CCCMprep

Pri scenároch GISS možno pozorovať zložitejší chod zmien odtoku vo vnútri roka oproti scenárom CCCM. Model GISSprep je pri scenároch zmien mesačných priemerov teploty vzduchu miernejší. Pri scenároch zmien mesačných úhrnov zrážok môže mať výrazný vplyv na rozdelenie odtoku aj

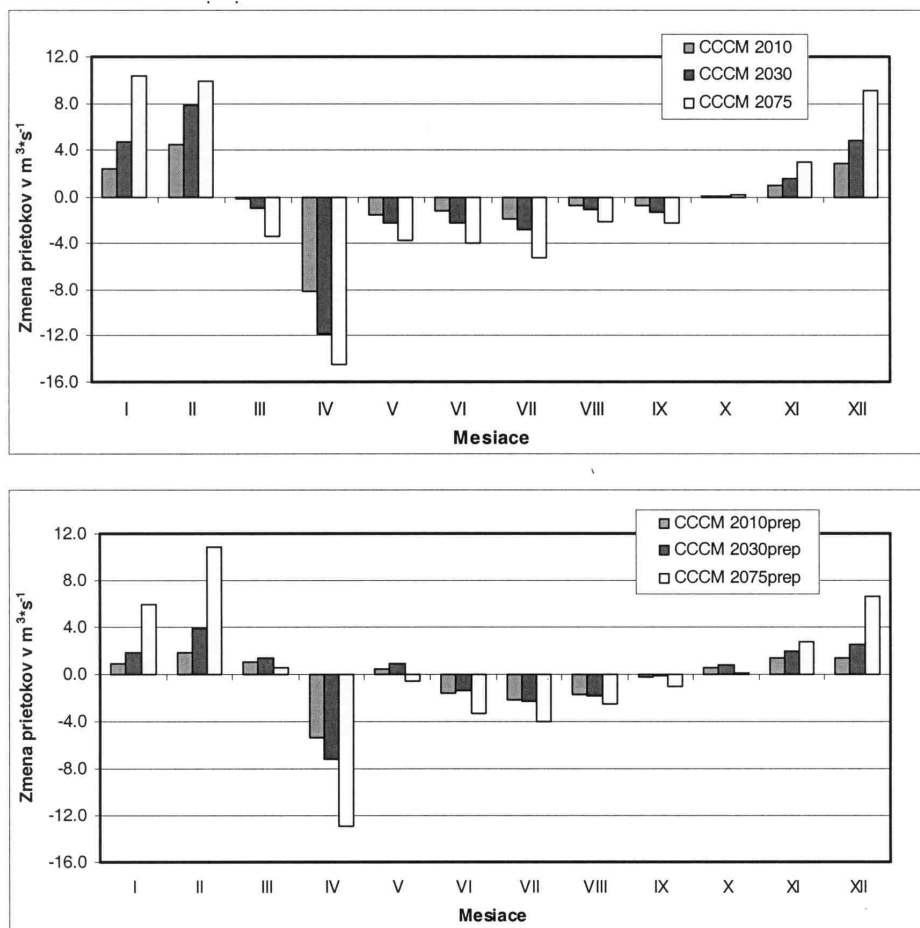
obdobie predpokladaného nárastu zrážok, pri staršom scenári takmer po celý rok okrem mesiaca september a pri GISSprep sú scenáre zmien mesačných úhrnov zrážok zložitejšie. Nárast zrážok sa predpokladá v mesiacoch apríl, máj a september, október. Vo zvyšných mesiacoch môžeme rátať s rovnomerným rozdelením zrážok. S výrazným poklesom vodnosti pri scenároch GISS môžeme rátať iba v apríli. Pre časový horizont 2075 do $27 \text{ m}^3/\text{s}$ a pre novší scenár $18 \text{ m}^3/\text{s}$. Relatívne vysoké vodnosti sa dajú predpokladať v období november až marec. So vzdďalovaním časového horizontu trend zvyšovania prietokov narastá. Pri horizonte 2075 môže vo februári dosiahnuť $21 \text{ m}^3/\text{s}$, resp. $11 \text{ m}^3/\text{s}$ pri GISSprep. Vo zvyšnej časti roka sa nepredpokladá výrazná zmena vodnosti (do $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Výsledky simulácií pre povodie Hrona pre scenáre GISS a GISSprep prezentuje obr. 11 a vyjadrujú zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov.



Obr. 11. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Hrone v stanici Banská Bystrica pre scenár GISS a GISSprep

V prípade povodia Kysuce po Kysucké Nové Mesto pri scenári CCCM možno predpokladať podobný trend zmeny vodnosti ako pri povodí Hrona. Nárast vodnosti sa dá očakávať od októbra po február, pri CCCMprep sa to posúva až do marca. Hodnoty pre horizont 2075 dosahujú do $10 \text{ m}^3/\text{s}$ a pre novší scenár do $11 \text{ m}^3/\text{s}$. Vo zvyšnej časti roka sa vo všeobecnosti dá predpokladať pokles odtoku alebo jeho vyrovnaný trend v prípade mesiacov máj a september pri CCCMprep. Najvýraznejší pokles pripadá na apríl, a to asi $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Výsledky sú dokumentované na obr. 12.

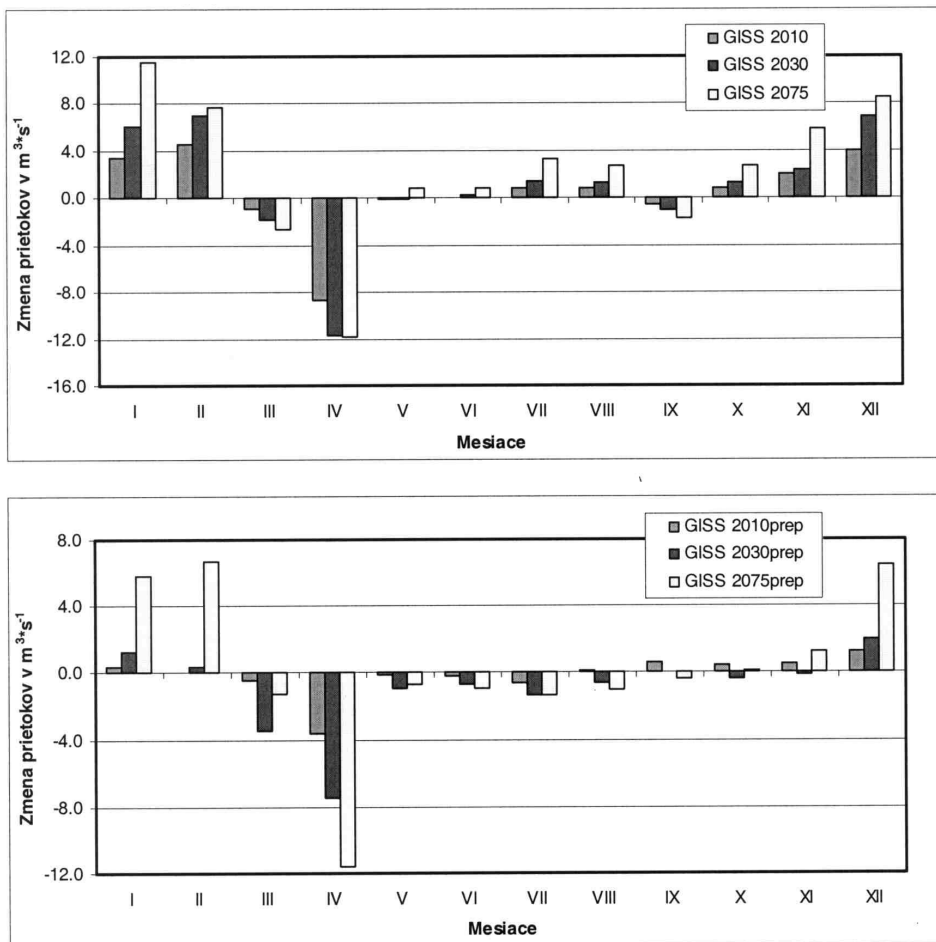


Obr. 12. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Kysuci v stanici Kysucké Nové Mesto pre scenár CCCM a CCCMprep

Pri scenároch GISS je priebeh odlišný. Pokles vodnosti sa dá očakávať v mesiacoch marec, apríl, pre časový horizont 2075 do $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Jednoznačný nárast pri staršom scenári možno očakávať v období október až február, s maximom v januári do $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri GISSprep možno rátať s nárastom vodnosti

v období december až február, s maximom vo februári do $7 \text{ m}^3/\text{s}$ pri najvzdialenejšom horizonte. Vo zvyšnej časti roka sa nepredpokladá výrazná zmena vodnosti, čo môže byť zapríčinené rovnomerným rozdelením zrážok aj napriek rastu teploty (max. zmena do $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

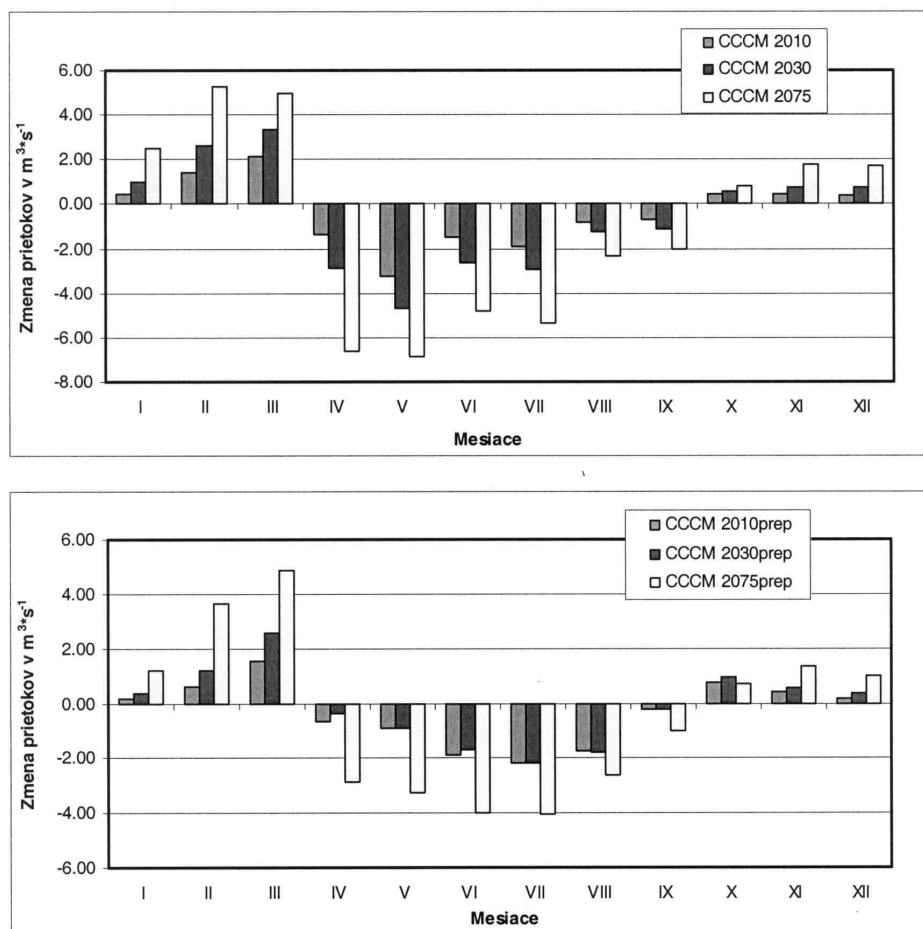
Výsledky simulácií zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov pre povodie Kysuce pre scenáre GISS reprezentuje obr. 13.



Obr. 13 Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Kysuci v stanici Kysucké Nové Mesto pre scenár GISS a GISSprep

Pri scenároch CCCM sa nám v povodí Popradu zmena odtoku prejavila najmenej. Pri obidvoch scenároch možno predpokladať nárast vodnosti v polovici roka, a to v mesiacoch október až marec. V mnohých prípadoch je tento nárast nepatrný do $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Najvýraznejší nárast sa dá očakávať vo februári, pri staršom scenári $5 \text{ m}^3/\text{s}$, pre najvzdialenejší horizont sa to posúva na

marec, a to tiež približne $5 \text{ m}^3/\text{s}$ pre CCCMprep. Pre najbližší horizont 2010 sa dá očakávať nárast vodnosti do $2 \text{ m}^3/\text{s}$, zvyčajne do $1 \text{ m}^3/\text{s}$. V mesiacoch október až december možno očakávať relatívne menší nárast odtoku v porovnaní s mesiacmi na začiatku roka. V mesiacoch apríl až september možno uvažovať s poklesom vodnosti, pričom výraznejší pokles je pri staršom scenári okolo $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri CCCMprep je tento pokles $4 \text{ m}^3/\text{s}$ pri najvzdialenejších horizontoch. Výsledky simulácií pre Poprad pre CCCM dokumentuje obr. 14.

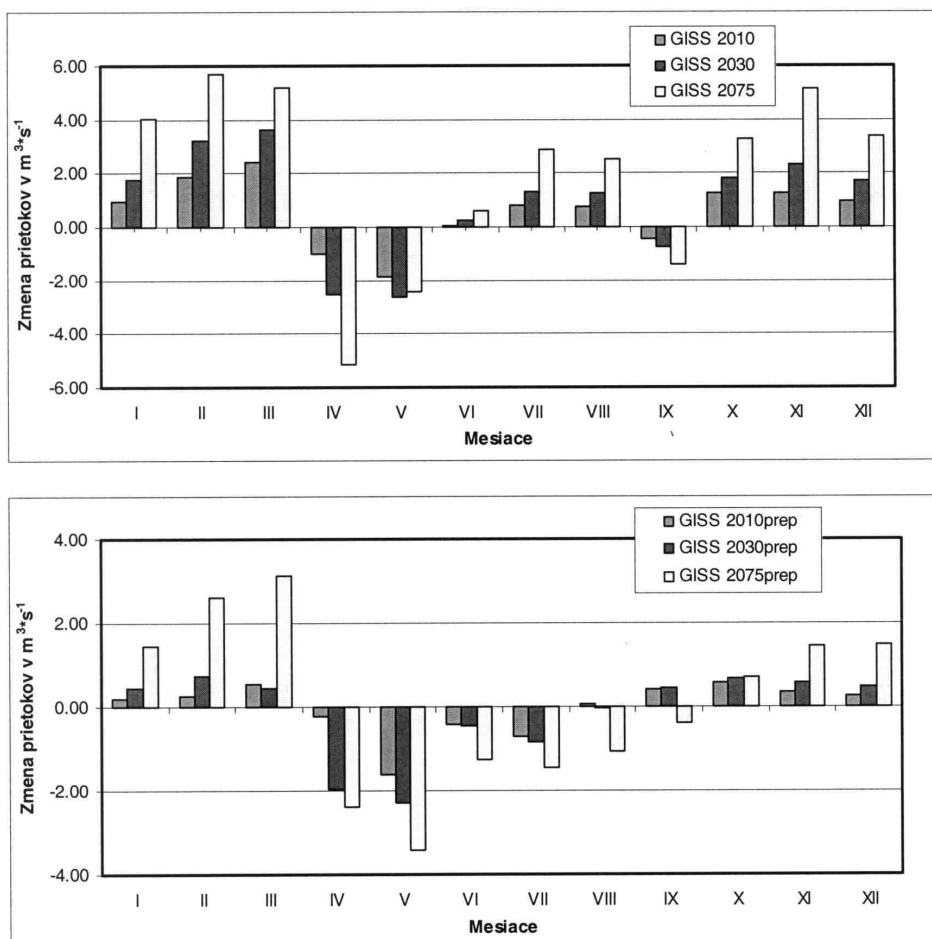


Obr. 14. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Poprade v stanici Chmeľnica pre scenár CCCM a CCCMprep

Pri scenároch GISS je režim odtoku zložitejší. Aj pri týchto scenároch sa zmena odtoku prejavila najmenej. V období október až marec sa dá predpokladať v oboch scenároch s nárastom vodnosti s maximom vo februári do $6 \text{ m}^3/\text{s}$ pri najvzdialenejšom horizonte a $3 \text{ m}^3/\text{s}$ pre GISSprep. S nárastom možno ešte uvažovať v mesiacoch júl, august, a to iba pri staršom scenári do 3

m^3/s . Pokles pripadá na mesiace apríl, máj a september, pričom hodnoty poklesu odtoku dosahujú $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri GISSprep možno uvažovať s poklesom od apríla a je posunutý až do augusta. Hodnoty poklesu tiež nedosahujú ani v tomto prípade vysokú úroveň, maximálne $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

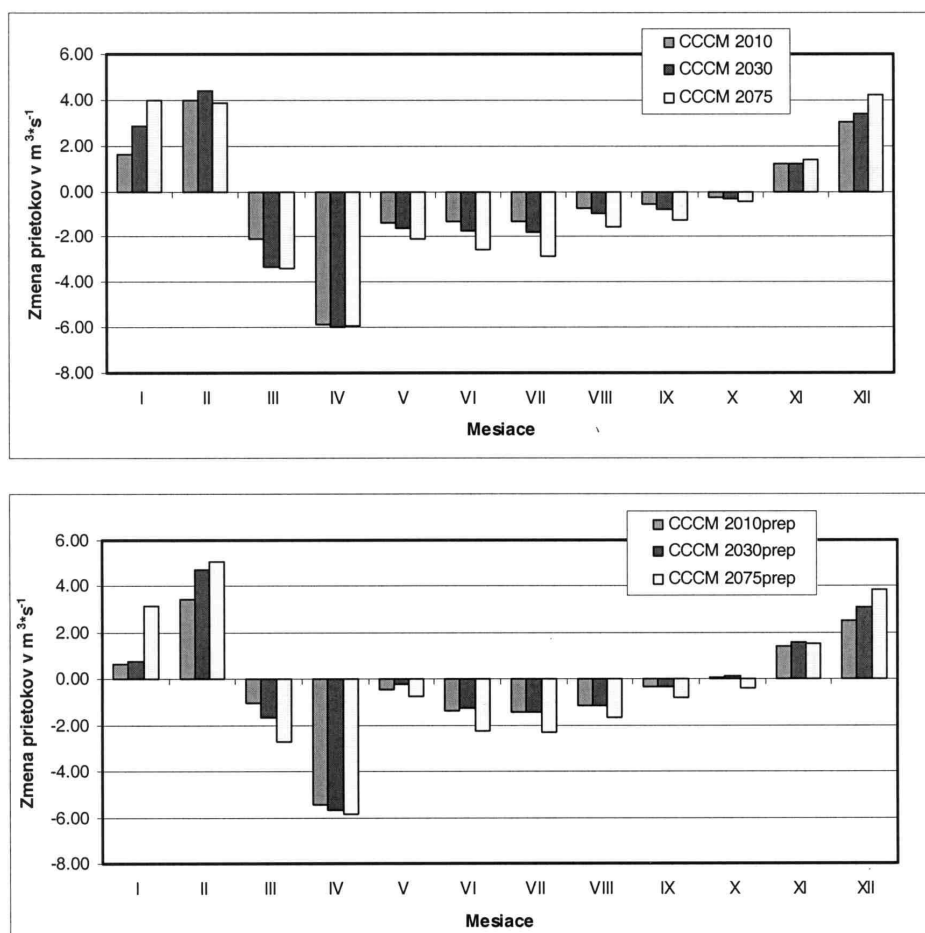
Výsledky simulácií pre Poprad pre GISS scenáre reprezentuje obr. 15.



Obr. 15. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Poprade v stanici Chmeľnica pre scenár GISS a GISSprep

V prípade Torysy sa nárast vodnosti dá očakávať od novembra po február, v prípade CCCMprep sa nárast posúva na október a je len nepatrný. Hodnoty pre horizont 2075 dosahujú do $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pre novší scenár tiež okolo $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Je zaujímavé, že pre časový horizont 2010 dosahuje nárast v mnohých prípadoch hodnotu $2 \text{ m}^3/\text{s}$ až $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Tieto hodnoty sú všeobecne najvyššie v porovnaní s ostatnými povodiami. S poklesom vodnosti možno uvažovať od marca po

október, pričom najvýraznejší pokles možno očakávať v apríli. Pri oboch scenároch sa pokles v tomto mesiaci pohybuje okolo $6 \text{ m}^3/\text{s}$ pri všetkých časových horizontoch. V porovnaní s referenčným obdobím sa v letných mesiacoch predpokladá pokles vodnosti do horizontu 2035 asi od $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ do $2 \text{ m}^3/\text{s}$. V horizonte 2075 sa dá očakávať pokles do $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Výsledky simulácií pre Torysu pre CCCM scenáre poskytuje obr. 16.



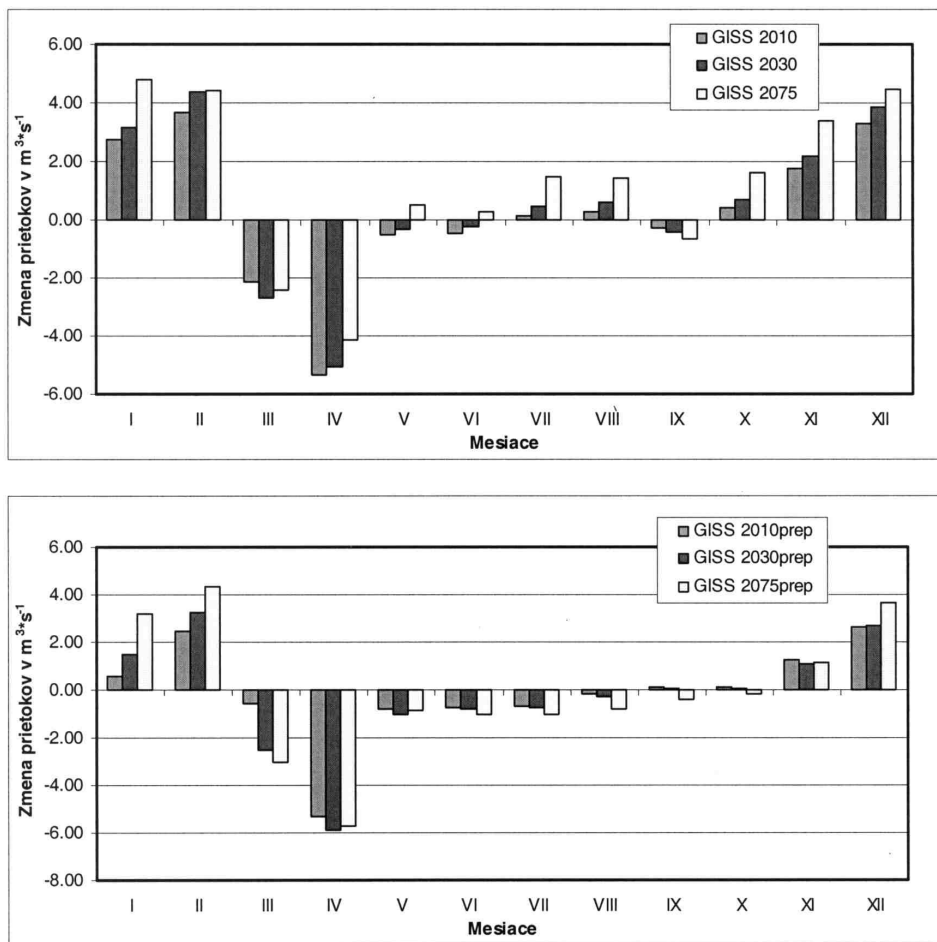
Obr. 16. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Toryse v stanici Košické Oľšany pre scenár CCCM a CCCMprep

Pri GISS scenároch výrazný pokles vodnosti pripadá na mesiace marec, apríl, pričom hodnoty poklesu odtoku dosahujú do $5 \text{ m}^3/\text{s}$ pri staršom scenári, nepatrný pokles sa predpokladá ešte v mesiacoch máj, jún a september, ale nie v najvzdialenejšom horizonte. Pri GISSprep možno uvažovať s poklesom odtoku v celom období od marca po august, pričom najvýraznejší pokles je v mesiacoch marec, apríl (do $6 \text{ m}^3/\text{s}$), v ostatných mesiacoch je tento pokles do 1

m^3/s . Jednoznačný nárast možno očakávať na konci jesene a v zime do $5 \text{ m}^3/\text{s}$ v prípade staršieho scenára a okolo $4 \text{ m}^3/\text{s}$ pre prípad GISSprep. Nárast možno očakávať ešte v letných mesiacoch do $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, ale iba v prípade staršieho scenára.

Aj pre scenáre GISS, v prípade časového horizontu 2010, možno predpokladať najvyššie hodnoty nárastu v porovnaní s ostatnými povodiami. Tento nárast dosahuje v mnohých prípadoch hodnotu $2 \text{ m}^3/\text{s}$ až $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Výsledky simulácií pre Torysu pre scenáre GISS sú prezentované na obr. 17 a vyjadrujú zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov.



Obr. 17. Zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov na Toryse v stanici Košické Olšany pre scenár GISS a GISSprep

ZÁVER

Výsledky našej analýzy vplyvu klimatickej zmeny na režim odtoku vo vybraných povodiach Slovenska sú v zhode s výsledkami iných autorov. Hladný a kol. (1996) pri simulácii zmien odtokov v ČR vo vybraných povodiach použili viaceré modely (Bilan, Clirun a Sacramento) s dôrazom na inkrementálne (prí-rastkové) scenáre. Výsledky ich analýz podobne naznačili nárast odtokov v chladnej časti roka a pokles vodnosti od marca do októbra. Vzhľadom na rôzne použité modely a scenáre však nie je možné priame porovnanie výsledkov. Výsledky prác našich autorov (Szolgay et al. 1997, Čunderlík 2000 a Hlavčová et al. 2000) sú z hľadiska zmeny trendu odtoku v zhode s našimi výsledkami. Z výsledkov analýzy práce Pekárovej et al. (1996) vidieť, že odtoky simulované HBV modelom (kalibrovaný na obdobie 1987-1991) v povodí Ondavy so vstupmi GCMs sú nižšie ako za súčasného stavu. Podľa všetkých použitých scenárov dôjde k zníženiu prietokov v letných mesiacoch a naopak, v mesiacoch december – február dôjde k zvýšeniu prietokov. V práci však autori neuvádzajú, na aký časový horizont sa výsledky ich analýzy vzťahujú. Uvedené trendy zmien odtokov sú tiež v zhode s našimi výsledkami, ale tiež nie sú priamo porovnateľné.

Výsledky hydrologických scenárov zmeny vnútroročného rozdelenia odtoku vybraných tokov Slovenska je potrebné interpretovať s miernou dávkou opatrnosti. Je to spôsobené potrebou zohľadňovať neistoty v metodickom postupe, a to najmä v týchto bodoch:

- Parametre modelu boli určené kalibráciou a pri samotnom modelovaní zmien vnútroročného rozdelenia odtoku, kde za zmenených zrážkových a teplotných pomerov nie je možné zistiť a zohľadniť ich možnú zmenu.
- Klimatické scenáre pre územie Slovenska vychádzajú z gridových bodov nachádzajúcich sa mimo nášho územia, a preto nemusia vždy zohľadňovať skutočné fyzicko-geografické podmienky vybraných povodí.
- Scenáre udávajú iba odhad zmien dlhodobých priemerných hodnôt zrážok a teploty vzduchu, pričom ich variabilitu nedokážu vystihnúť.

Príspevok bol spracovaný v rámci projektu č. 1/0042/03 financovaného grantovou agentúrou VEGA.

LITERATÚRA

- BÁLINT, G., DOBI, I., MIKA, J. (1996). Runoff simulation assuming global warming scenarios. In *XVIII Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft*, 19/1. Graz (Technical University), pp. 75-88.
- COOPER, D. M., WILKINSON, W. B., ARNELL, N. W. (1995). The effects of climate changes on aquifer storage and river baseflow. *Hydrological Scientific Journal*, 40, 273-292.
- ČUNDERLÍK, J. (2000). *Vplyv klimatickej zmeny na vnútroročné rozdelenie odtoku vo vybraných povodiach Slovenska*. Rigorózna práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.
- DANIHLÍK, R. (2002). *Vplyv klimatickej zmeny na režim odtoku vo vybraných povodiach Slovenska*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.

- DANIHLÍK, R. (2002). Vplyv klimatickej zmeny na režim odtoku vo vybraných povodiach Slovenska. In *14. Konferencia mladých hydroológov, zborník referátov*. Bratislava (Slovenský hydrometeorologický ústav), pp. 79-90.
- HLADNÝ, J. et al. (1996). Dopady možné zmeny klimatu na hydrologii a vodní zdroje v České republice. In *Národní klimatický program České republiky*, 20. Praha (ČHMÚ).
- HLAVČOVÁ, K., ČUNDERLÍK, J. (1998). Impact of climate change on the seasonal distribution of runoff in mountainous basins in Slovakia. *IAHS Publication*, 248, 39-46.
- HLAVČOVÁ, K. et al. (2000). Modelovanie vplyvu zmeny klímy na režim odtoku v regióne stredného Slovenska. In *Národný klimatický program Slovenskej republiky* 9. Bratislava (MŽP a SHMÚ), pp.15-38.
- HLAVČOVÁ, K. et al. (2002). Impact of climate change on the seasonal distribution of runoff in Slovakia. *Journal of Civil Engineering*, 10, 57-68.
- Kaczmarek, Z. (1993). Water balance model for climate impact analysis. *Acta Geophysica Polonica*, 41, 169-178.
- LAPIN, M. et al. (2000). Nové scenáre klimatickej zmeny pre SR na báze výstupov prepojených modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs). In *Národný klimatický program Slovenskej republiky*, 8. Bratislava (MŽP a SHMÚ), pp. 5-34.
- LEAVESLEY, G. H. (1994). Modelling the effects of climate change on water resources. *Climate Change*, 28, 125-132.
- MAJERČÁKOVÁ, O., ŠEDIK, P. (1996). *Možné zmeny odtoku počas roka na tokoch Slovenska v dôsledku potenciálnych klimatických zmien*. Country Study Program Slovak Republic. Bratislava (MŽP a SHMÚ).
- PEKÁROVÁ, P. et al. (1996). Simulácia režimu odtoku za zmenených klimatických podmienok v povodí Ondavy. *Vodohospodársky časopis*, 44, 291-311.
- PETROVIČ, P. (2000). Climate change impact on hydrological regime in the Nitra river basin. In *Národný klimatický program Slovenskej republiky*, 9. Bratislava (MŽP a SHMÚ), pp. 58-73.
- SZOLGAY, J., HLAČOVÁ, K., MOSNÝ, V. (1995). *Časové a priestorové hodnotenie charakteru kolísania prvkov hydrologickej bilancie na území východného Slovenska*. Záverečná správa pre Národný klimatický program Slovenskej republiky. Bratislava (Slovenská technická univerzita).
- SZOLGAY, J., ČUNDERLÍK, J., PARAJKA, J. (1996). *Scenáre zmien odtokového režimu vo vybraných kotlinách a pahorkatinách Slovenska*. Národný klimatický program Slovenskej republiky. Bratislava (Slovenská technická univerzita).
- SZOLGAY, J. et al. (1997). Vplyv klimatickej zmeny na odtokový režim na SR. In *Národný klimatický program Slovenskej republiky*, 6. Bratislava (MŽP a SHMÚ), pp. 11-107.
- SVOBODA, A. (1996). Možný vplyv globálnych zmien na zásobovanie vodou nádrže Vihorlat. In *Vplyv antropogénnej činnosti na vodný režim nížinného územia*. Michalovce (Ústav hydrologie SAV), pp. 104-109.
- TRIZNA, M. (1994). Vplyv globálnych zmien na vodnosť tokov. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 35, 63-85.
- VOGEL, R. M., BELL, CH. J., SURESH, R., FENNESSEY, N. M. (1996). Regional assessment of the impact of climate change on the reliability, resilience and vulnerability of water supply systems. *Preprints of the Gyorgy Kovacs Colloquium*. Paris (UNESCO), pp. 143-158.
- YATES, D. (1994). *WatBal – An integrated water balance model for climate impact assessment of river basin runoff*. Laxenburg (IIASA).

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE RUNOFF REGIME IN SELECTED RIVER BASINS IN SLOVAKIA

The study deals with the potential influence of a changed climate on runoff regime in selected river basins in Slovakia. For this work and its purpose, the spatially – lumped conceptual hydrological rainfall-runoff model WatBal was used. It is based on the work of Kaczmarek (1993). It was selected to model the impact of climate change on monthly runoff. A simple snowmelt submodel is incorporated into the model. The input is divided into direct surface runoff and infiltration. The soil moisture zone is simulated by one non-linear reservoir. Surface, subsurface and baseflow from the soil moisture reservoir are computed as separate runoff components. Evapotranspiration is computed on the basis of the simulated soil moisture and potential evapotranspiration. Potential evapotranspiration values are estimated by the Priestly-Taylor method or can be supplied by the model users.

The model was calibrated with data from the period of 1951-1980, which have been chosen as representative for the runoff regime of different regions. The results of the calibration from the selected catchments in Slovakia are given in figures 2-9. The model has proved to be capable of simulating runoff adequately and has been further applied for possible change within the year distribution of the long-term mean monthly discharges.

The input data are: mean monthly precipitation (mm/day) from the period 1951-1980, mean monthly runoff (mm/day) from the period 1951-1980, for the estimation of potential evapotranspiration is needed: mean monthly temperature (°C), long-term mean monthly sunshine (hour/day) and long-term mean monthly relative air humidity (%/100).

Two catchments have been chosen for the assessment of the changes in the distribution and values of the long term averages of the mean monthly river discharges. They are: the Hron (gauging station Banská Bystrica), Kysuca (gauging station Kysucké Nové Mesto), Torysa (gauging station Košické Olšany) and Poprad (gauging station Chmeľnica).

On the basis of hydrological scenarios for possible changes within the year, the distribution of the long-term mean monthly discharges for time horizons 2010, 2030 and 2075 were simulated. To make these, two scenarios for climate changes CCCM (1995, 2000) and GISS (1995, 2000) were applied.

Runoff changes simulated by WatBal model with input data adopted according to circulation models GISS and CCCM for the selected catchments in Slovakia are presented in figures 10-17. In the selected catchments of Slovakia both scenarios showed the same character of changes in the seasonal distribution of mean monthly runoff. In the months from November to February the mean monthly discharges should definitely increase. In the months from April to September we can expect decrease or in some catchments a balanced regime of runoff. The extremity of the decrease or increase of percentual changes of discharges grow with widening time horizon of the scenarios.

Translated by the authors