ČASOVÁ VARIABILITA ROČNÝCH PRIETOKOV VYSOKOHORSKÉHO POVODIA BELÁ ZA OBDOBIE 1901–2000

Pavla Pekárová, Ján Pekár, Juraj Pacl

Pri posudzovaní vplyvu klimatických zmien na zmenu hydrologického režimu toku je nutnou podmienkou vyhodnocovať zmeny hydrologických charakteristík z povodí, ktoré nie sú ovplyvnené ľudskou činnosťou. Ďalšou požiadavkou je, aby analyzované časové rady boli čo najdlhšie a aby boli homogénne. Takýmto radom prietokov je rad toku Belá v stanici Podbanské, vyhodnocovaný od roku 1928. V predloženej štúdii bol tento rad regresnou analýzou predĺžený o obdobie 1895–1927. Ďalej bola analyzovaná homogenita radu, boli hľadané trendy rastu/poklesu a spektrálnou analýzou boli identifikované významné viacročné periódy ročného radu prietokov Belej za obdobie 1895–2002. Najvýznamnejšia perióda identifikovaná spektrálnou analýzou má 3,6 roka. Významné sú i periódy 29-rokov; 36-rokov; 13-rokov; 4,2-roka a 2,4-roka. Dĺžka cyklov ca 3,6-roka pravdepodobne súvisí s Južnou osciláciou, vyjadrenou SO indexom. Dĺžka cyklov ca 2,47-roka môže súvisieť s QBO osciláciou. Dĺžka cyklov ca 13 rokov súvisí s Severoatlantickou osciláciou, vyjadrenou NAO indexom. Vyplýva z toho, že na priebeh kolísania odtoku Belej má vplyv ako NAO, tak i SO fenomén. Iba dôkladnejšie poznanie telekonekcie NAO, AO, SO, PDO alebo QBO fenoménov so zrážkovými, teplotnými a teda aj prietokovými radmi nás môže posunúť dopredu pri objasňovaní viacročnej variability odtoku a posudzovaní vplyvov klimatickej zmeny na odtok.

Kľúčové slová: analýza časových radov, prietoky, Belá, telekonekcia NAO, AO, SO, QBO, dlhodobá predpoveď odtoku

Time variability of annual discharge in the Belá mountainous catchment during 1901–2000. *While analyzing the impact of climate change on hydrological regime changes it is necessary to evaluate changes of hydrological characteristics of the basins that are uninfluenced by men activity. Next, the analyzed time series must be as long as possible and homogeneously. Such a time series, satisfying these conditions, is that of Belá: Podbanské, measured since 1928. In the study the time series was prolonged by regression analysis backwards to 1895. Next, homogeneity, long-term trends as well as multi-annual cycles were analyzed for the entire (1895–2002) time series. The most significant period is that of 3.6 year. Other significant periods are those of 29 years, 13 years, 4.2 year, and 2.4 year. The cycle of about 3.6 year probably depends on the Southern Oscillation (SO) represented by the SO index. The 2.47 cycle can be connected with QBO oscillation. Finally, the cycle of about 13 years is connected with North Atlantic Oscillation (NAO) represented by the NAO index. This implies that the fluctuation of the Belá runoff can be influenced by both, NAO and SO phenomena. Only the deeper understanding the teleconnection between NAO, AO, SO, PDO, or QBO phenomena and precipitation, temperature, and discharge time series allow us to explain the discharge multi-annual variability as well as consider the impact of climate change on runoff.*

Key words: time series analysis, discharge, Belá, teleconnection, NAO, AO, SO, QBO, long-term runoff prediction

---

ÚVOD

Pri posudzovaní vplyvu zmien využitia krajiny na zmenu hydrologického režimu je nutnou podmienkou vyhodnocovať charakteristiky z povodí, ktoré sú čo najmenej ovplyvnené ľudskou činnosťou a v ktorých sú prietoky vyhodnocované za čo najdlhšie obdobie. Za týmto účelom bolo vybraných 36 staníc pre Národný klimatický program SR (Majerčáková, Šedík, 1994). Jedno z povodí NKP je povodie Belej po profil Podbanské, kde sú vyhodnocované prietoky už od roku 1928.

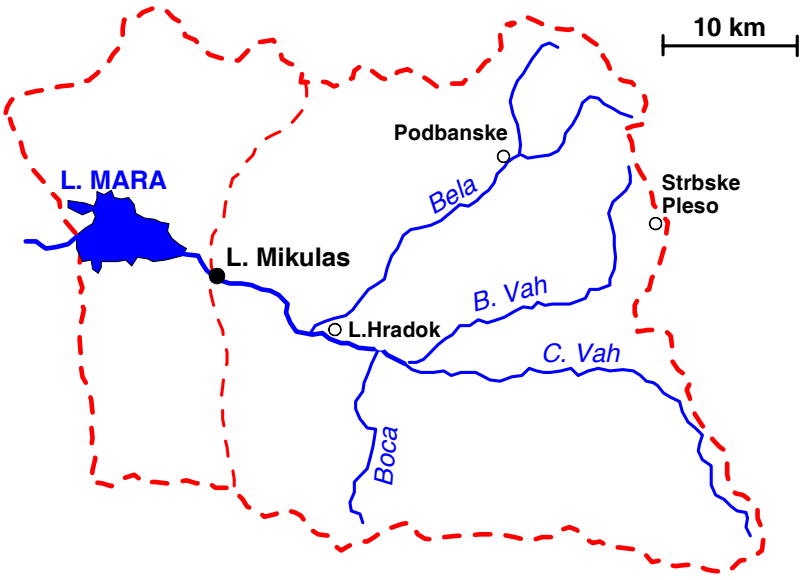
Belá, odvodňujúca rozhranie Západných a Východných Tatier je bystrinou, reprezentujúcou odtokové pomery najvyššej časti Karpát. Povodie Belej po Podbanské bolo do polovice 20. storočia veľmi málo zasiahnuté ľudskou činnosťou – bolo využívané salašníckym spôsobom na pasenie oviec a dobytka. Po uzákonení Tatranského národného parku (1948) bola pastva zrušená a lesy sú obhospodarované ako vodohospodársky významné ochranné porasty (Pacl, 1959-1994). Preto je povodie Belej po Podbanské mimoriadne vhodné pre štúdium prirodzeného hydrologického režimu.

Ciele práce sú:

1. Opis povodia Belej a doplnenie ročného radu prietokov Belej v stanici Podbanské od roku 1895 do roku 1928.
2. Štatistická analýza doplneného radu ročných prietokov za obdobie 1895–2002 (homogenita a stacionarita, trendová analýza, autokorelačná a spektrálna analýza daného radu.
3. Spracovanie dlhodobej predpovede vývoja priemerných ročných prietokov Belej v stanici Podbanské pre budúce desaťročie metódou skrytých periód (harmonickým modelom).

1 ANALÝZA PRIETOKOVÉHO RADU BELEJ

Záujem o rieku Belú má svoje začiatky krátko po 1.svetovej vojne, v dvadsiatych rokoch minulého storočia. Z hľadiska energetického využitia pravostranných bystrinných prítokov Váhu z oblasti Vysokých a Západných Tatier, ako aj z hľadiska protipovodňovej ochrany sa uvažovalo o ich prevedení do laterálneho kanála vedúceho podhorím od Belej až po Jaloveckú dolinu. Tento projekt bol zakrátko nahradený projektom generálnej úpravy Váhu. Povodiu Belej, ako najvodnejšiemu prítoku Váhu nad Liptovským Mikulášom – ale aj najnebezpečnejšiemu v čase povodní – sa dostalo mimoriadnej pozornosti. Už roku 1924 bola na Podbanskom zriadená vodomerná stanica, pod sútokom jej hlavných zdrojníc, Tichého a Kôprového potoka. Záznamy o vodných stavoch sa vykonávali 3 x denne, v čase zvýšenej vodnosti sa konali tzv. mimoriadne pozorovania, v prípade nutnosti aj v nočných hodinách. Pozorovania vykonávali až do roku 1938 príslušníci finančnej pohraničnej stráže, potom ich prevzali zamestnanci lesných správ. V roku 1949 boli pozorovania vodných stavov spresnené doplnením vodomerného profilu limnigrafom. Od povodne v r.1958 (100-ročná voda takmer v celom povodí Horného Váhu) hydrologický prieskum v tatranskej oblasti dostal širšie dimenzie, zvyšoval sa počet vodomerných staníc a zintenzívnili sa merania prietokov za účelom precíznejšieho vyhodnocovania denných, v niektorých prípadoch aj hodinových hodnôt. Od roku 1949 sa Správa Tatranského národného parku podieľala na údržbe vodomerných profilov v spravovanom území a zabezpečila pozorovania svojimi vonkajšími pracovníkmi, strážcami národného parku a technikmi. Všetky tieto postupy zabezpečili sústredenie hydrologických podkladov v takom rozsahu, že v r.1959 (po katastrofálnej povodni na Hornom Váhu a Poprade) bola v rámci výskumu prírodných pomerov národného parku riešená aj úloha Vodná bilancia územia Tatranského národného parku, ktorej predchádzalo podrobné vyhodnotenie katastrofálnej povodne z júna 1958 v osobitnej štúdii. Pri riešení uvedenej výskumnej úlohy sa hydrologické údaje z dvadsaťročných pozorovacích radov pre 30 vodomerných staníc z územia Tatranského národného parku spracovávali počítačmi, čo bol priekopnícky krok v dejinách slovenskej hydrológie. Pri všetkých týchto prácach sa povodiu Belej venovala osobitná pozornosť, lebo sa z neho získavali cenné hydrologické poznatky o tvorbe a režime odtoku v horských oblastiach a vodomerná stanica Podbanské bola začlenená ako varovná hlásna stanica protipovodňovej ochrany. Mimoriadne zefektívnenie hydrologických meraní a prieskumov v povodí Belej podnietila celosvetová spolupráca hydrológov v rámci programu UNESCO, nazvanom Medzinárodná hydrologická dekáda (1965-1974). Povodie Belej bolo (práve pre svoju hydrologicky dominantnú časť po Podbanské) zaradené medzi reprezentatívne povodia. Malo charakterizovať hydrologický režim v najvyššej, činnosťou človeka málo ovplyvnenej časti masívu Karpát, s možnosťou porovnávania hydrologického režimu v dolnej časti povodia, činnosťou človeka ovplyvnenej. V uvedenom období hydrologický režim povodia Belej po Podbanské charakterizovali údaje z 3 vodomerných profilov s limnigrafmi, 3 totalizátory, 1 meteorologická stanica doplnená ombrografom; na tokoch sa konali expedičné merania súčasne zameraných prietokov v pozdĺžnych profiloch toku, expedičné merania vodnej hodnoty snehovej pokrývky, z ktorých jedno bolo takrečeno celoplošné, pri ktorom bolo 6 skupín meračov dopravených vrtuľníkom a snehovými skútrami do najvyšších a najneprístupnejších častí povodia odkiaľ pri zostupe robili snehomerné snímky. V rámci medzinárodnej spolupráce bola možnosť využitia údajov z poľského meteorologického observatória na Kasprowom wierchu, vo výške okolo 2000 metrov n.m. Doplňovanie a overovanie údajov umožnili hydrologické merné profily, totalizátory a zrážkomery v nižších častiach povodia Belej, ako aj tie, ktoré sa nachádzali na opačnej strane rozvodnice. Značná časť prístrojového vybavenia zostala v povodí aj po skončení Medzinárodnej hydrologickej dekády a slúži zberu údajov až do súčasnosti.



Obr. 1. Schéme povodia horného Váhu po Liptovský Mikuláš.

Fig.1. Scheme of the Upper Vah basin up to L. Mikulas.

Belá vzniká sútokom dvoch zdrojníc – Tichého a Kôprového potoka, v nadmorskej výške 977 metrov (obr. 1). V reliéfe povodia Tichého potoka majú prevahu hôľne tvary, zodpovedajúce reliéfu Západných Tatier, pre povodie Kôprového potoka je typická prevaha výrazného vysokotatranského reliéfu. Takmer celú vysokohorskú časť povodia tvorí kryštalinikum (žuly, ruly, migmatity); malá časť pravostranného povodia Tichého potoka je budovaná vápencami a dolomitami s výrazným krasovým reliéfom, najmä v povodí Tomanovho potoka. Kryštalinická časť povodia je prevažne nepriepustným podložím; spolu s vysokohorským a hôľnym reliéfom vytvára dobré podmienky pre rýchle stekanie zrážkovej vody dolu strmými svahmi. Retenčná schopnosť dobre priepustných sutín a osypov sa nemôže uplatniť v potrebnej miere s ohľadom na malú rozlohu aj mocnosť týchto útvarov.

Klimatické pomery. Povodie Belej je viac-menej rovnako vzdialené od Baltického mora, Atlantického oceánu a Jadranského mora (600-850-700 km), má relatívne kontinentálnu polohu. Jeho základný podnebný ráz (stredoeurópske vnútrozemie) je výrazne ovplyvnený prudko sa meniacou nadmorskou výškou povodia (na vzdialenosť 10 km sa povodie prevýši o 575 metrov, až do pásma s vysokohorskými prvkami podnebia).
Režim zrážok má typický jednoduchý ročný chod, s jedným minimom v zime (zvyčajne vo februári) a s jedným maximom v lete (jún až júl). Pribúdanie zrážok s rastom nadmorskej výšky je v povodí viac-menej pravidelné.

Odtokové pomery. Povodie Belej leží v oblasti najvyšších zrážkových úhrnov na území Slovenska. V povodí jednoznačne prevládajú letné povodne, podmienené intenzívnymi lejakmi z výrazného teplotného rozhrania nad Karpatami. Priaznivé morfologické aj klimatické faktory podmieňujú rýchly povrchový odtok dažďovej vody a jej sústreďovanie do riečnych korýt. Dlhodobý priemerný špecifický odtok Belej pri Podbanskom je 37 $l.s^{-1}km^{-2}$. Podobne vysoké odtoky sa vyskytujú v povodiach na severnej strane Západných a Východných Tatier. Tabuľka 1 podáva názorný obraz o vytváraní vodných zásob v povodí a o ich zmenách. Akumulácia vodných zásob prebieha od septembra predchádzajúceho roku do marca nasledujúceho roku, kedy dosahuje najvyšších hodnôt (obr. 2). V apríli a máji sú odtoky vyššie ako zrážky, odtok je krytý zásobou vody uloženej v snehovej pokrývke a v podpovrchovej zóne. Od júna je povrchový odtok krytý zrážkami, ale straty, najmä z výparu, sú ešte natoľko vysoké, že vyčerpávanie zásob vody z povodia pokračuje až do výrazného prebytku zrážok, za súčasného poklesu výparnosti v priebehu septembra-októbra. V tabuľke 2 je uvedený prehľad charakteristík plies v povodí Belej.

Tab. 1 Základné charakteristiky povodia Belej a vodná bilancia povodia Belej po stanicu Podbanské

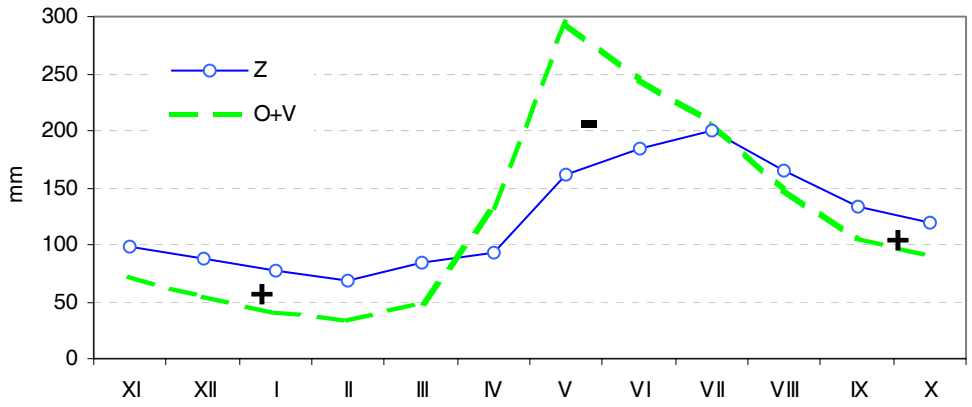
Tab. 1 Basic characteristics of the Belá basin, water balance

Tok	Tichý potok	Kôprový potok	Belá
Plocha povodia km^2	57,45	31,24	93,49
Najvyšší bod povodia m n.m.	2371	2495	2495
Najnižší bod povodia m n.m.	977	977	920
Rozdiel nadm. výšok v m	1394	1518	1575
Priemerná výška povodia m n.m.	1585	1636	1572
% zalesnenia	33	30	36
1931–1960	1931–1960	1931–1960	1901-2000
Priemerný ročný úhrn zrážok mm	1640	1720	1473
Priemerný ročný odtok mm	1250	1480	1181
Priemerná ročná stratová výška mm	390	240	292
Priemerný ročný prietok m^3.s^{-1}	2,28	1,47	3,5
Priemerný ročný špecif. odtok l.s^{-1}km^{-2}	39,7	47	37,4
Koeficient odtoku	0,76	0,86	0,8
Maximálny prietok m^{3}s^{-1}	125	90	170
Minimálny prietok m^{3}s^{-1}	0,29	0,18	0,48

Tab. 2 Jazerá v povodí Bele, morfometrické údajej

Tab. 2 Tarns in the Belá basin

Pleso	Nadm. v. m	Nadm. v. m	Plocha m^2	Objem m^3	Hĺbka max. m	str. m	Dolina
Temnosmrečinské Vyšné	1725	1725	55625	414712	20	7,45	Kôprová
Temnosmrečinské Nižné	1677	1677	117045	1501500	38,1	12,83	Kôprová
Terianske Vyšné	2124	2124	5550	8470	4,3	1,53	Nefcerka
Terianske Nižné	1940	1940	55580	871668	47,3	15,68	Nefcerka
Kobylie	1734	1734	2975	735	1	0,25	Kôprová
Tomanove Vyšné	1597	1597	1925	1234	1,7	0,64	Tomanova
Tomanove Nižné	1592	1592	945	284	0,9	0,3	Tomanova
Tomanove Malé	1617	1617	272	90	1	0,33	Tomanova



Obr. 2.Priebeh prvkov vodnej bilancie povodia Belá určená z dlhodobých priemerných mesačných hodnôt.

Fig.2 Monthly water balance in Belá basin.

1.1 Doplnenie prietokových radov Belej za obdobie 1985–1928

Pri doplnení prietokového radu zo stanice Belá: Podbanské za obdobie 1895–1928 sa postupovalo nasledovne (Rein, 1954; Kajetanowicz, 1960; Hladný a Pacl, 1974; Hlubocký 1974; Binark, 1979; Giesecke, 1983; Jordan a Meylan, 1986; Gutknecht, 1992):

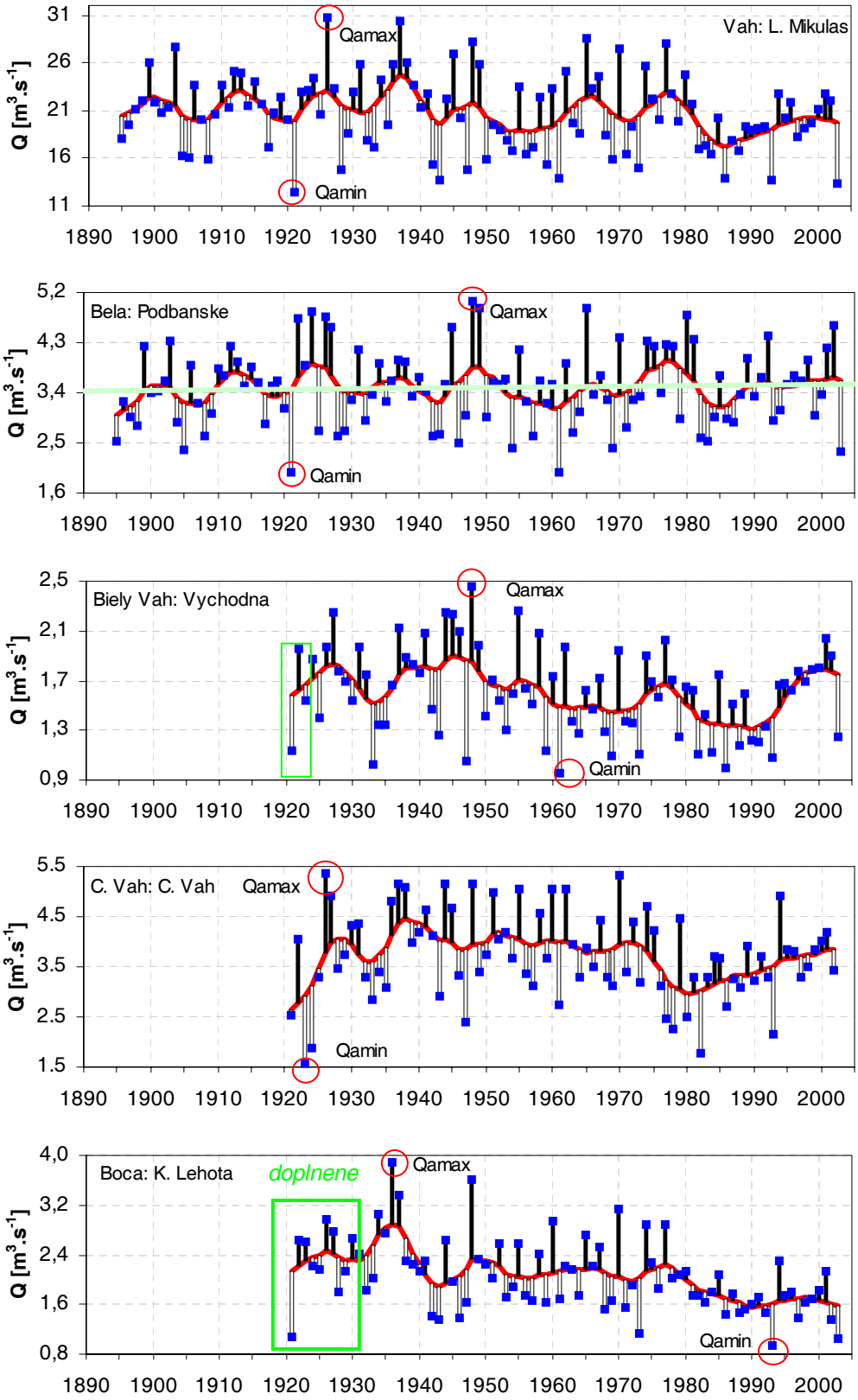
- Bola analyzovaná presnosť zrážkomerných údajov zo staníc Liptovský Hrádok, Podbanské, Štrbské Pleso, údajov z 3 totalizátorov situovaných priamo v povodí (doliny Tomanova, Tichá a Kôprová), z 2 totalizátorov v blízkej Bystrej doline a údajov z poľského meteorologického observatória na hraničnom Kasprowom vrchu.
- Boli vypočítané párové korelácie medzi jednotlivými miestami merania.
- Boli vyhodnotené závislostí medzi zrážkami a nadmorskou výškou povodia.
- Bolo vykonané plošné zahustenie bodových zrážkomerných údajov polygónovou metódou a metódou Krigeho.

Najhodnovernejšími sa ukázali postupy: Gradient zrážok s rastom nadmorskej výšky medzi stanicami Liptovský Hrádok-Podbanské-totalizátory v Tichej a Kôprovej doline. Z tejto korelačnej závislosti sa mohli odvodiť zrážkové úhrny pre priemernú nadmorskú výšku povodia, ktorá je zhodná s nadmorskou výškou zodpovedajúcou polovici plochy povodia Belej po Podbanské, a je takmer zhodná s ťažiskom povodia. Uvedenými postupmi boli podľa ročných úhrnov zrážok v Liptovskom Hrádku z obdobia 1895–1930 stanovené ročné úhrny zrážok pre ťažisko povodia. K vyhodnoteniu odtoku z tejto primárnej informácie bolo nutné poznať súčinitele odtoku v rôzne vodných rokoch, od mimoriadne suchých, cez priemerné, po mimoriadne vodné. Tieto hodnoty sa získali určením odtokových súčiniteľov pre roky, z ktorých už boli známe priemerné ročné prietoky (pravidelné vyhodnocovanie priemerných denných prietokov od r.1930, nepravidelné – overovanie presnosti merných kriviek od r.1928, údaje o priemerných vodných stavoch a mimoriadnych v čase povodní od r. 1925). Hodnoty odtokových súčiniteľov z tak krátkeho radu bolo nutné overiť údajmi z dlhšieho radu. Získali sa výpočtom ročných súčiniteľov odtoku z jednotlivých rokov obdobia 1931–1960 a ich zatriedením podľa pomernej početnosti prekročenia zrážok, ako aj prietokov za toto obdobie. Orientačne bolo možné overiť hodnoty odtokových súčiniteľov ešte na údajoch z 30 profilov v tatranskej oblasti, pre ktoré boli vypočítané priemerné denné prietoky za roky 1941–1960, pričom s profilom Podbanské bezprostredne susedilo 5 vodomerných profilov. Z ročných úhrnov zrážok vynásobených koeficientom odtoku sa určili ročné hodnoty odtoku. Kontrolnou hodnotou bola stratová výška, ktorú bolo možné ešte overovať podľa údajov z uvedených 30-tich povodí tatranskej oblasti. Záverečná kontrola hodnôt ročných prietokov z obdobia 1895–1918 sa vykonala porovnaním s údajmi o vodných stavoch v stanici L. Mikuláš, podľa ročeniek maďarskej hydrografickej služby.
Priemerné ročné prietokové rady z B. Váhu a Boce (1921–1930) boli doplnené regresnou analýzou na základe ročných úhrnov zrážok a teploty vzduchu. Na základe korelačnej analýzy bola na doplnenie prietokového radu B. Váhu vybraná stanica Š. Pleso a pre prietoky Boce zrážky so staníc V. Boca a L. Hrádok. V tabuľke 4 je uvedená korelačná matica párových korelácií analyzovaných klimatických a prietokových ročných radov údajov za existujúce úseky obdobia (1901–1990). Doplnenie priemerných ročných prietokov o údaje od roku 1921 je dôležité pre výpočet hydrologických charakteristík a trendov (tab. 3), nakoľko v roku 1921 boli zaznamenané mimoriadne nízke hodnoty ročných prietokov v SR i v iných stredoeurópskych tokoch. Naopak, rok 1926 bol v strednej Európe extrémne vodný. Priebehy priemerných ročných prietokov z piatich staníc sú vykreslené na obr. 3.

Tab. 3 Základné štatistické charakteristiky vybraných tokov z povodia horného Váhu za vybrané obdobie, A – plocha povodia, Qa – dlhodobý priemerný ročný prietok, qa –špecifický odtok , b - dlhodobý trend

Tab. 3 Basic statistical characteristics of selected rivers in the Upper Vah basin, A –area, Qa – average annual discharge, qa – specific runoff , b – long-term trend

Rieka - stanica	Obdobie	Nadm. výška		A	Qa	qa	c_s	c_v	b
	roky	min	priem.	km^2	m^3s^{-1}	$l.s^{-1}km^{-2}$			
Belá – Podbanské	1901–2000	922	1651	93,49	3,50	37,3	0,18	0,20	0,0
Biely Váh – Východná	1921–2000	732	1032	105,	1,60	15,3	0,16	0,22	–,0039
Čierny Váh – Č. Váh	1921–2000			244,	3,70	15,3	-0,10	0,24	–,0053
Boca – Kráľ. Lehota	1921–2000			116,6	2,08	18,0	0,73	0,28	-0,0102
Váh – L. Mikuláš	1901–2000	569	1136	1107	20,70	19,0	0,221	0,19	-0,0246



Obr. 3. Priebehy priemerných ročných prietokov tokov z horného Váhu, odchýlky od dvojnásobných 5-ročných kĺzavých priemerov, Qamin – absolútne minimum, Qamax – absolútne maximumí. Prietoky z Č. Váhu sú očistené od prevodu vody.

Fig. 3. Course of average discharge of selected rivers in the Upper Vah basin, , residuals of 5-year moving averages values, Qamin – absolute minimum, Qamax – absolute maximum.

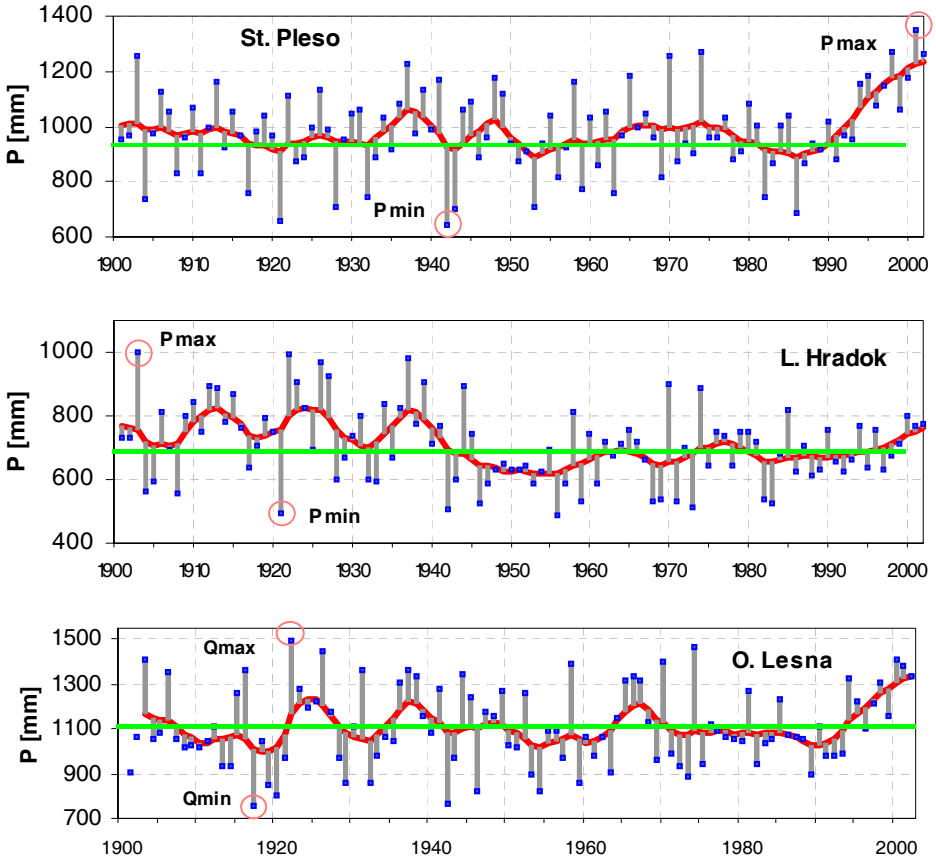
Na obrázku 4 sú vykreslené priebehy ročných úhrnov zrážok zo staníc Liptovský Hrádok (1901–2003), Štrbské Pleso (1901–2003) a Oravská Lesná (1951–2003).

Tab. 4 Príklad korelačnej matice vybraných priemerných ročných radov

Tab. 4 Example of the correlation matrix for selected annual time series

	T_S.P.	*T_L.H.*	*Z_Pop.*	*Z_L.H.*	*Z_S.P.*	*Z_Mik*	*Z_Boca*	*Q_Belá*	*Q_B.Vah*	*Q_C.Vah*	*Q_Boca*	*Q_VLM*	*Q_VS*
T_S.P.	1.00												
T_L.H.	0.89	1.00											
Z_Pop.	-0.03	0.04	1.00										
Z_L.H.	-0.14	-0.03	**0.72**	1.00									
Z_S.P.	-0.20	-0.04	**0.78**	**0.75**	1.00								
Z_Mik	-0.01	0.15	**0.79**	**0.86**	**0.83**	1.00							
Z_Boca	-0.08	0.03	**0.72**	**0.73**	**0.82**	**0.78**	1.00						
Q_Belá	-0.19	-0.12	0.53	0.49	**0.66**	0.51	**0.60**	1.00					
Q_B.Vah	-0.22	-0.16	0.57	0.50	**0.63**	0.55	0.47	**0.62**	1.00				
Q_C.Vah	-0.13	-0.11	**0.61**	0.53	0.53	0.59	0.46	0.54	**0.73**	1.00			
Q_Boca	-0.08	0.00	0.59	**0.67**	**0.68**	**0.65**	**0.73**	0.57	0.57	**0.67**	1.00		
Q_VLM	-0.11	-0.07	**0.69**	**0.71**	**0.80**	**0.71**	**0.77**	**0.81**	**0.77**	**0.72**	**0.79**	1.00	
Q_VS	-0.21	-0.10	**0.69**	**0.70**	**0.79**	**0.75**	**0.69**	**0.66**	**0.81**	**0.67**	**0.67**	**0.84**	1.00

T_S.P. - priemerná ročná teplota vzduchu, Š. Pleso, L. Hrádok
Z_Pop -ročný zrážkový úhrn, Poprad, L. Hrádok, Š. Pleso, Mikuláš, V. Boca
Q_Boca - priemerný ročný prietok, Boca, B. Váh, Č. Váh, Váh: L. Mikluláš, Váh: Šaľa



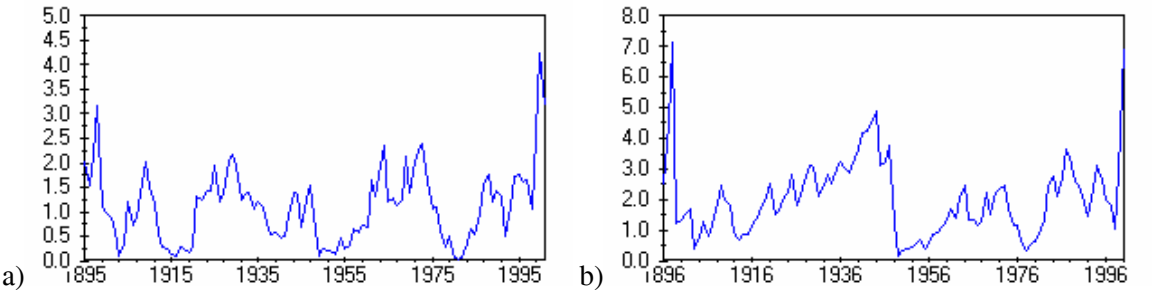
Obr. 4. Priebehy vybraných radov priemerných ročných úhrnov zrážok, odchýlky od dvojnásobných 5-ročných kĺzavých priemerov, Pmin – absolútne minimum, Pmax – absolútne maximum.

Fig. 4. Course of mean annual precipitation totals, residuals of 5-year moving averages values, Pmin – absolute minimum, Pmax – absolute maximum.

2 ANALÝZA RADU ROČNÝCH PRIETOKOV V STANICI BELÁ: PODBANSKÉ

2.1 Testovanie homogenity radu ročných prietokov Belej 1895–2002

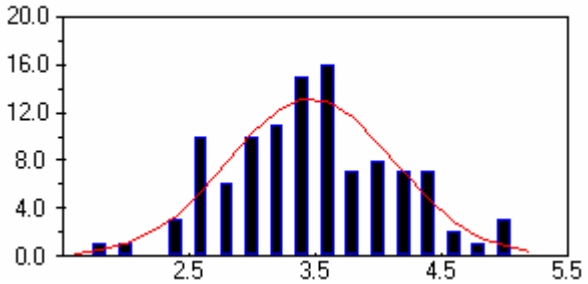
Homogenitou hydrologických radov v SR sa zaoberali napr. Hlubocký (1986), Benický (1992) alebo Majerčáková, Šedík (1994). Pri testovaní homogenity prietokového radu Belej (1885–2002) sme použili softvérový balík AnClim (autor Štepánek, 2003). Homogenitu radu ročných prietokov Belej sme testovali Alexanerssonovým testom (Alexandersson, Moberg, 1997; Alexandersson, 1986):
a) pre zmenu strednej hodnoty; b) pre zmenu strednej hodnoty a variancie.
Hodnoty testovanej charakteristiky (pozri obr. 5) sú pod hlboko kritickými hodnotami (pre zmenu strednej hodnoty je kritická hodnota 7,85 na hladine významnosti 90% a 9,15 pre 95%). Rad priemerných ročných prietokov Belej v stanici Podbanské je homogénny. Z hľadiska dĺžky radu je rad prietokov Belej jedinečný v celej strednej Európe. Povodie Belej po profil Podbanské môžeme považovať za povodie neovplyvnené činnosťou človeka. Preto je tento rad mimoriadne vhodný na analýzu vplyvu prípadnej klimatickej zmeny na tvorbu odtoku.



Obr. 5 Alexanerssonov test. Výstup z AnClim softvéru (autor Štepánek, 2003).
a) pre zmenu strednej hodnoty, kritická hodnota 9,15 pre hladinu významnosti 95%;
b) pre zmenu strednej hodnoty a variancie, kritická hodnota 16,85 pre hladinu významnosti 95%.
Fig. 5 Alexanerssons test. AnClim software (Štepánek, 2003).
a) for changes in mean values, critical value 9.15 on 95% significance level;
b) for changes in mean value and variance, critical value 16.85 on 95% significance level.

2.2 Testovanie normality radu ročných prietokov Belej 1895–2002

Niektoré štatistické testy a postupy vyžadujú normalitu testovaného radu.
Pri testovaní normality rozdelenia radu ročných prietokov bol použitý test dobrej zhody (X^2-test) a Kolmogorovov-Smirnovov test. Z výsledkov testov vyplynulo, že daný rad na zvolenej hladine významnosti spĺňa podmienky normaliry. Na vykreslenie čiary prekročenia priemerných ročných prietokov (obr. 6) sme použili normálne rozdelenie (μ=3,4648; σ=0,653). Za mimoriadne suchý rok budeme považovať rok s prietokom nižším ako Q_{99} = 1,94 m^3s^{-1} (dlhodobý ročný prietok s pravdepodobnosťou prekročenia 99%). Za mimoriadne vodný rok budeme považovať rok s prietokom vyšším ako Q_{10} = 4,3 m^3s^{-1} (dlhodobý ročný prietok s pravdepodobnosťou prekročenia 10%). Základné štatistické charakteristiky ročných prietokov Belej za obdobie 1895–2002 sú uvedené v tabuľke 5.



Obr. 6 Histogram rozdelenia priemerných ročných prietokov Belej v stanici Podbanské za obdobie 1895–2002.

Fig. 6 Histogram of mean annual discharge of Belá River in Podbanské, period 1895–2002.

Tab. 5 Základné štatistické charakteristiky ročných prietokov Belej za obdobie 1895–2002

Tab. 5 Basic statistical characteristics of annual discharge time series, Belá River, 1895–2002

Length of the Series	108	C. of Kurtosis	-0.0881
Arithmetic Mean	3.4648	Maximal Value	5.0 (Year: 1948)
Standard Deviation	0.6533	Minimal Value	1.7 (Year: 1921)
Variance	0.4268	1st Quartile (25%)	3.0
C. of Variance	18.85%	Median	3.4
C. of Skew	0.0997	3rd Quartile (75%)	3.9

2.3 Testovanie existencie dlhodobého trendu radu ročných prietokov Belej 1895–2002

Pri testovaní existencie dlhodobého trendu rastu alebo poklesu prietokového radu Belej (1885–2002) sme použili softvérové balíky AnClim (autor Štepánek, 2003) a CTPA (autori Procházka a kol., 2001). Nájdený mierny rastúci trend – koeficient rastu 0,0026 m^3s^{-1} za rok – bol testmi vyhodnotený ako štatisticky nevýznamný (tab. 6) van Gelder a kol. (2000).

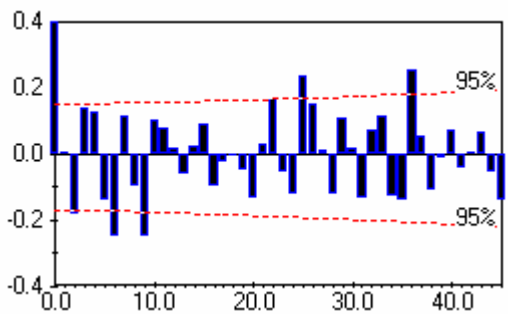
Tab. 6 Test významnosti trendu ročných prietokov Belej za obdobie 1895–2002

Tab. 6 Test of change in trend, discharge series of Belá, 1895–2002

Linear Regression Model (x=Time):
(y=b0+b1*x): y = 3.3223+0.0026*x
T-test for Coefficient b1 : T=1.301 <? 1.982 (95%)
: (NON significant)
Trend /10 years: 0.026
Index of Determination (Correlation): 0.0157 (0.1254)
Variance (Residuals+Estimates=Total) : 0.4162+0.0066=0.4228

2.4 Autokorelačná a spektrálna analýza radu ročných prietokov Belej 1895–2002

Analýza časových radov obsahuje viaceré užitočné metódy identifikácie periodickosti v časových radoch, napr. autokorelačnú analýzu (AC), singulárnu spektrálnu analýzu SSA (Singular Spectrum Analysis), spektrálnu analýzu maximálnej entropie MESA (Maximum Entropy Spectrum Analysis - Power Spectrum PS), metódu empirických ortogonálnych funkcií EOFs (Empirical Orthogonal Functions Method) / Fouriérovu analýzu FA (Fourier Analysis), alebo metódu hlavných komponentov MMC (Method of Main Components), (Nobre & Shukla, 1996; Jevrejeva & Moore, 2001; Ramachandra Rao & Hamed, 2003; Liritzis & Fairbridge, 2003; Van Gelder et al., 2000; Prochazka et al.,2001). V tejto štúdii sme pri identifikácii dĺžky períód použili autokorelačnú analýzu - autokorelogram, FA - periodogram a MESA metódu.
Na obr. 7 je vykreslený autokorelogram radu priemerných ročných prietokov Belej. Z grafu vyplýva, že medzi hodnotami radu priemerných hodnôt existuje významná korelácia (záporná pre 2, 6 a 9 rokov, kladná pre 22, 25 a 36 rokov).



Obr. 7. Autokorelogram radu priemerných ročných prietokov Belej.

Fig. 7. Auto-correlogram of discharge series of Belá River.

2.5 Telekonekcia radu ročných prietokov Belej s NAO, AO, SO a QBO fenoménmi

Najvýznamnejšia perióda, identifikovaná spektrálnou analýzou metódou MESA, má 3,6 roka (obr. 8c). Významné sú i periódy 12,8 roka 5,3; 4,2 roka a 2,47 roka. Metódou kombinovaného periodogramu (Pekárová a kol., 2003) boli identifikované dlhé periódy 15,5; 22,5 a 31 rokov (obr. 9).

Keďže dĺžky viacročných období nie sú celé čísla, nie je ich možné autokorelogramom radov ročných hodnôt identifikovať. Napr. najvýznamnejšia perióda – 3,6 roka – sa na autokorelograme výrazne nezobrazí. Prejavuje zvýšenými autokorelačnými koeficientmi pre 3 a 4 roky. Čiastočne tento nedostatok možno odstrániť tým, že by sme použili na autokorelogram mesačné hodnoty prietokov, očistené od ročného cyklu. Pri vyhodnocovaní mesačných autokorelogramov sa totiž väčšina autorov uspokojí s nájdením 12 mesačného (prípadne ešte 6 mesačného a 4 mesačného cyklu) a nepokračujú v hľadaní ďalších cyklov odstránením 12, 6 a 4 mesačného cyklu.

Nájdenie cyklu 3,6 roka v prietokových radoch Slovenska a celej Európy dokazuje, že viacročné kolísanie prietokov (cez zrážkové úhrny) ovplyvňuje Južná oscilácia (SO), a teda známy fenomén ENSO. Dĺžka cyklov ca 3,6-roka, ktorá bola nájdená v prietokovom rade Belej, bola nájdená i v rade indexov SO (SOI).

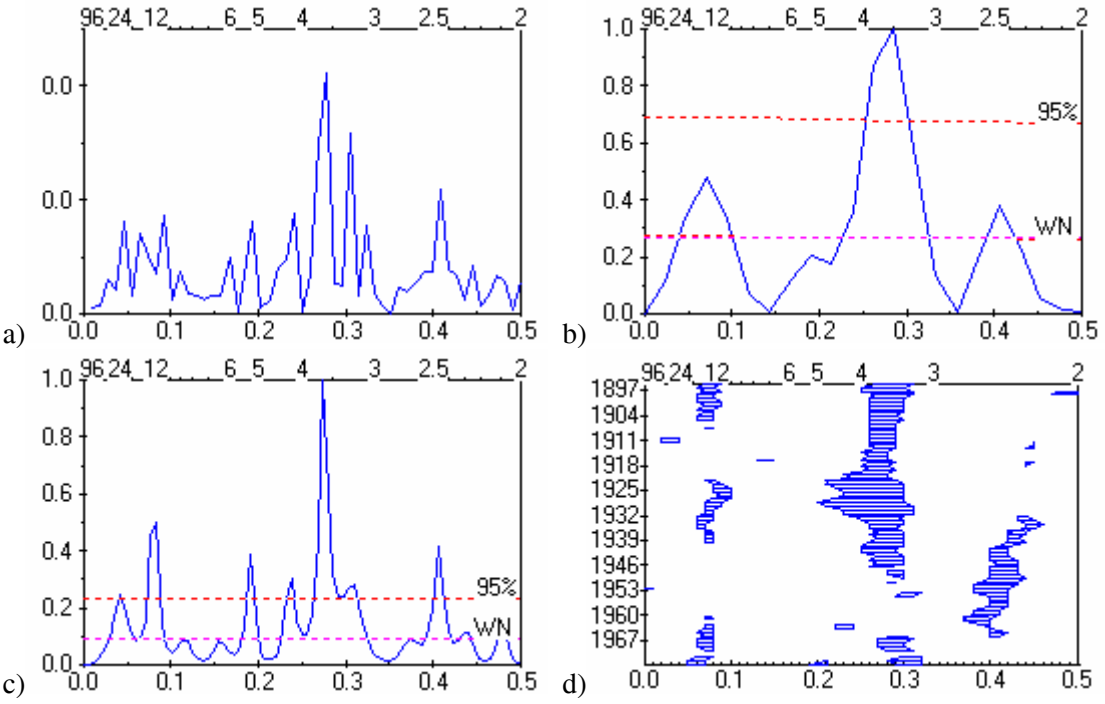
Dĺžka cyklov ca 2,47-roka môže súvisieť s QBO osciláciou.

Dĺžka cyklov ca 13 rokov súvisí s Severoatlantickou osciláciou, vyjadrenou NAO indexom.

Dĺžka cyklov ca 28-31 rokov súvisí s Arktickou osciláciou, vyjadrenou AO indexom.

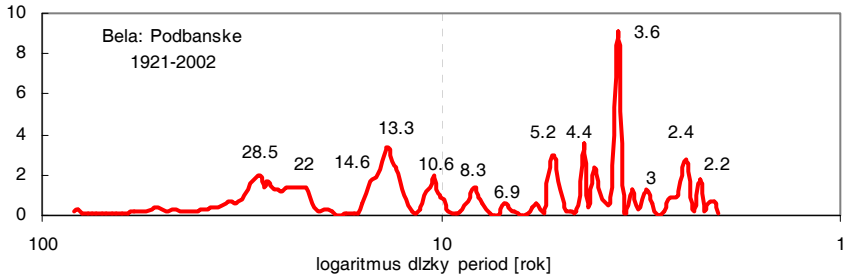
Vyplýva z toho, že na priebeh kolísanie odtoku Belej má vplyv ako NAO, AO, tak i SO fenomén. Povodím Belej (Vysokými Tatrami) prechádza pomyselná hranica (tiahnúca sa od Marseille po st. Peterburg) medzi severozápadnou Európou, kde ročné prietoky v poslednom desaťročí rástli a juhovýchodnou Európou, kde bol trend prietokov klesajúci (Pekárová, Pekár, 2004; Pekárová a Miklánek, 2004a,b).

Pred skúmaním vplyvu klimatických zmien na odtok je potrebné tieto cylkické zložky z ročných radov odstrániť, a pri analýze dôsledkov klimatických zmien používať očistené rady prietokov od cyklickej zložky. Technicky je to však mimoriadne náročné na dôkladné analýzy.

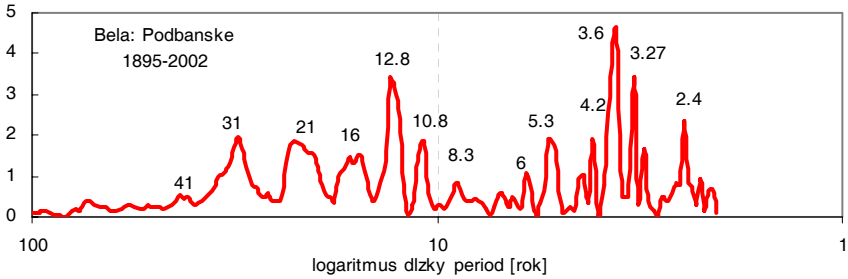


Obr. 8 Spektrálna analýza priemerných ročných prietokov Belej (softvér AnClim, Štepánek, 2003). a) Periodogram; b) PS Tukey; c) PS MESA; d) dynamic MESA.. Hore na osi x sú roky.

Fig. 8 Spectral analysis of mean annual discharge of Belá River (software AnClim, Štepánek, 2003). a) Periodogram; b) PS Tukey; c) PS MESA; d) dynamic MESA..



a)



b)

Obr. 9 Kombinovaný periodogram priemerných ročných prietokov Belej pre dve obdobia, periódy v rokoch a) 1921–2002, b) 1985–2002.

Fig. 9 Combined periodogram of the mean annual discharge of Belá River for two periods, periods in years a) 1921–2002, b) 1985–2002.

3 DLHODOBÁ PREDPOVEĎ ROČNÝCH PRIETOKOV

Cieľom posledného paragrafu je spracovať konkrétnu dlhodobú predpoveď vývoja priemerných ročných prietokov Belej v stanici Podbanské, vychádzajúc z teórie cyklickosti odtoku. Použitý bol postup opísaný v (Pekárová a Pekár, 2005; alebo Pekárová, 2003). Podobný postup použili napr. Hermann a Egger (1980) pri predpovedi prietokov rieky Isar.
Testovaný bol celý rad lineárnych autoregresných modelov.

- model založený na harmonických funkciách (skryté periódy);
- lineárne B-J autoregresné modely AR, MA, ARMA a SARIMA;
- model obsahujúci harmonickú (deterministickú) zložku i B-J autoregresnú zložku;
- model obsahujúci harmonickú zložku, B-J autoregresnú zložku a regresnú zložku modelujúcu vplyv NAO.

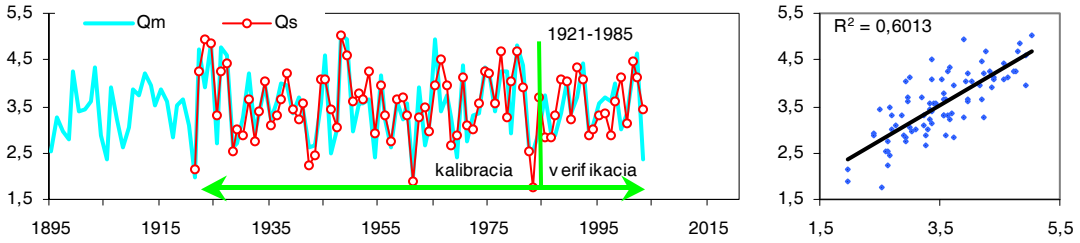
Všeobecne tieto modely možno schematicky možno opísať rovnicou (1).

$$X_t = A_0 + \sum_{j=1}^{m}\left(A_j \cos(\lambda_j t) + B_j \sin(\lambda_j t)\right) + ARIMA + CR + \varepsilon_t \qquad t = 1, \ldots, N. \qquad (1)$$

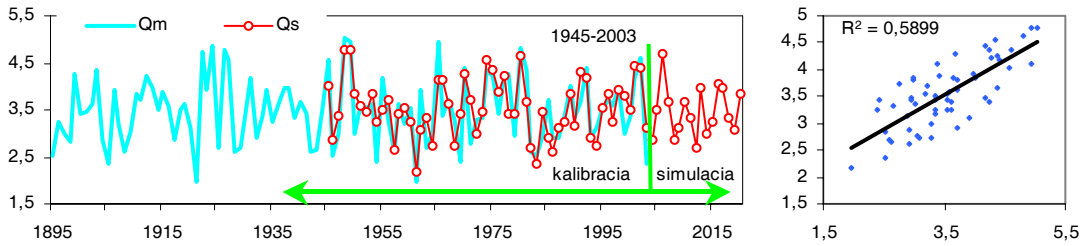
harmonická zložka *B-J zložka* *vplyv NAO* *biely šum*

kde: λ_j - významné frekvencie, určené kombinovaným periodogramom;
A_j, B_j, $j = 1,2, \ldots m$ - parametre (A_0 - stredná hodnota radu);
ARIMA - autoregresná zložka, B-J model;
C_j - regresný koeficient vplyvu NAO na prietok;
ε_t - náhodná zložka (biely šum).

Pre predpoveď ročných prietokov Belej v stanici Podbanské sme použili model obsahujúci iba harmonickú zložku. Na obr. 10b je vykreslený priebeh priemerných ročných prietokov meraných a predpovedaných modelom skrytých periód. Z výsledkov dlhodobej predpovede vyplýva, že rok 2006 by mal byť pravdepodobne v povodí Belej veľmi vodný rok.



a)



b)

Obr. 10 Priebeh priemerných ročných prietokov Belej meraných a simulovaných harmonickým modelom. a) verifikácia modelu na období 1974–2004; b) predpoveď.

Fig. 10 Course of average annual discharge of Belá river and its simulation by the harmonic model. a) verification of the model 1974–2004; b) prediction.

4 Závery

Z analýzy radu priemerných ročných prietokov Belej v stanici Podbanské vyplývajú nasledovné uzávery:

1. Rad ročných prietokov Belej v stanici Podbanské je homogénny.
2. Dlhodobý trend radu je nulový.
3. Najvýznamnejšia perióda identifikovaná spektrálnou analýzou má 3,6 roka. Významné sú i periódy 29-rokov; 36-rokov; 13-rokov; 4,2-roka a 2,4-roka.

Dĺžka cyklov ca 3,6-roka, ktorá bola nájdená v prietokovom rade Belej pravdepodobne súvisí s Južnou osciláciou, vyjadrenou SO indexom. Dĺžka cyklov ca 2,47-roka môže súvisieť s QBO osciláciou. Dĺžka cyklov ca 13 rokov súvisí s Severoatlantickou osciláciou, vyjadrenou NAO indexom. Vyplýva z toho, že na priebeh kolísanie odtoku Belej má vplyv ako NAO, tak i SO fenomén.
Iba dôkladnejšie poznanie telekonekcie NAO, AO, SO, PDO alebo QBO fenoménov so zrážkovými, teplotnými a teda aj prietokovými radmi nás môže posunúť dopredu pri objasňovaní viacročnej variability odtoku a vplyvov klimatickej zmeny na odtok.

Poďakovanie
Spracovanie štúdie bolo podporené Agentúrou na podporu vedy a techniky prostredníctvom finančnej podpory č. APVT-51-006502 a VEGA 5056 a VEGA 2032.

5 Literatúra

Alexandersson H, Moberg A. (1997): Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *J. Climatol.*, **17**: 25–34.
Alexandersson H. (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.,* **6:** 661–675.
Benický J. (1992): Testovanie homogeneity hydrologických údajov. Práce a štúdie 124, VÚVH, Bratislava. 106.
Binark A.M. (1979): Simultane Niederschlagsgenerierung an mehreren Stationen eines. Mitteil. Heft 16. Institut Wasserbau III., Karlsruhe.
Giesecke J., Schmitt P., Meyer H. (1983): Vergleich der Rechenmethoden für Gebietsniederschläge. Die Wasserwirtschaft, Heft 73, 1–7.
Gutknecht D. (1992): Erfassung der Abflussvorgänge in kleinen natürlichen Einzugsgebieten, Mitteilungsblatt des Hydrograph. Dienstes Österr. Nr. 68.

Hermann A., Egger F. (1980): Das Abflussverhalten im Flussgebiet der Isar unter Anwendung der Fourier-Analyse., Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Jahrg. 1924, Heft 3. 4.
Hladný J., Pacl J. (1974): Analýza vzťahov medzi zrážkami a odtokom v horských povodiach, Vodohosp. Čas., roč.XXII, č.4, 346–356.
Hlubocký B. (1974): Reprezentatívne povodie Belej – predbežné vyhodnotenie režimu povrchových vôd. Správa, HMÚ, Bratislava, 79 str.
Hlubocký B. (1986): Homogenita hydrologických radov 1931–1980. Práce a štúdie 38, SHMÚ, Bratislava, 19-29.
HMÚ, (1963): Charakteristické hydrologické údaje slovenských tokov. Bratislava, HMÚ, 38 str.
Jevrejeva S, Moore JC. (2001): Singular Spectrum Analysis of Baltic Sea ice conditions and large-scale atmospheric patterns since 1708. Geoph. Res. Letters, 28, 23, 4503-4506.
Jordan J. P., Meylan P. (1986): Estimation spatiale des précipitations dans ľouest de la Suisse par la méthode du Kriging., EPF Lausanne, Publication no. 232.
Kajetanowicz Z. (1960): Genetyczne podstawy obliczeń hydrologicznych, Politechnika Krakówska – Habil. Práca.
Liritzis I, Fairbridge R. (2003): Remarks on astrochronology and time series analysis of Lake Sake varved sediments. J. Balkan Geoph. Soc., 6, 3, 165–172.
Majerčáková O, Šedík P. (1994): Zmeny odtokov na Slovenských tokoch. NKP SR, Bratislava, 11 str.
Nobre P, Shukla J. (1996): Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. J. Climate, 9, 10 2464–2479.
Pacl J. (1959): Katastrofálna povodeň v oblasti Tatier v júni 1958, Sborník prác o Tatr. nár., zv.3, 17–56.
Pacl J. (1973): Hydrológia Tatr.nár.parku, Sborník prác o Tatr.nár.parku, zv. 15, 181–238.
Pacl J. (1983): K otázke opráv zrážkomerných údajov, Vodohosp. Čas., 31, č.3–4.
Pacl J. (1994): Tatranský národný park – Vodstvo, In: Tatranský národný park – Biosférická rezervácia, Publ. TANAP, 66–78.
Pekárová P. (2003): Dynamika kolísania odtoku svetových a slovenských tokov. VEDA, Bratislava; 222 str.
Pekárová P, Miklanek P, Pekar J. (2003): Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. J. Hydrol. 274: 62–79.
Pekárová P, Miklanek P. (2004a): Abflusstrends slowakischer Flüsse und mögliche Zusammenhänge mit ENSO/NAO - Erscheinungen. Österreichische Wasser- und Abfalllwirtschaft, Springer, 1-2: 17–25.
Pekárová P, Miklanek P. (2004b): Occurrence of the dry periods in European runoff series. In CD ROM - XXII. Conference of the Danubian Countries. Brno, 12 str.
Pekárová P, Pekar J. (2004): Teleconnections AO, NAO, SO, AND QBO with interannual streamflow fluctuation in the Hron Basin. J. Hydrol. Hydromech. 52: 279–294.
Pekárová P., Pekár, J. (2005): Long-term discharge prediction for the station Turnu Severin (the Danube) using linear autoregressive model. Hydrol. Process. (In press).
Procházka M, Deyl M, Novický O. (2001): Technology for Detecting Trends and Changes in Time Series of Hydrological and Meteorological Variables - Change and Trend Problem Analysis (CTPA). User's Guide. CHMI, Prague; 25 str.
Rao RA, Hamed K. (2003): Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrological Data. J. Hydrol., 279, 125–143.
Rein F. (1954): Poznámky k přibývání srážek s rostoucí nadmořskou výškou, Meteorologické Zprávy VII/1954, č.2.
Štepánek P, (2003): AnClim - software for time series analysis. Dept. of Geography, Fac. of Natural Sciences, MU, Brno; http://www.sci.muni.cz/~pest/AnClim.html
Van Gelder P, Kuzmin VA, Visser PJ. (2000): Analysis and statistical forecasting of trends in river discharge under uncertain climate changes. In: River flood defense. (Eds: Tonsmann & Koch), Heft 9/Sep., Kassel Univ., 10str.

Autori

RNDr. Pavla Pekárová, CSc., ÚH SAV, Račianska 75, 831 02 Bratislava, Slovenská Republika

Pekarova@uh.savba.sk

RNDr. Jan Pekar, PhD., Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, Slovenská Republika

pekar@center.fmph.uniba.sk

RNDr. Juraj Pacl, CSc., 394 46 Č. Řečice 341, Česká Republika

jpacl@sendme.cz