

**DLHODOBÝ VÝVOJ HYDROLOGICKEJ BILANCIE
V POVODÍ TOPLÉ ZA OBDOBIE 1961 – 2015
ČASŤ II: SIMULÁCIA VÝVOJA ODTOKU ZA ZMENENÝCH KLIMATICKÝCH
POMEROV MODELOM BILAN**

Marcel Garaj, Pavla Pekárová, Pavol Miklánek, Ján Pekár

Druhá časť štúdie je venovaná vyhodnoteniu zmien jednotlivých zložiek odtoku v mesačnom časovom kroku v povodí rieky Topľa po stanicu Hanušovce nad Topľou. Jednotlivé zložky odtoku boli modelované modelom BILAN. Model bol kalibrovaný a verifikovaný na obdobie 1961/62 – 2014/15. Nakalibrovaným modelom boli simulované zmeny odtoku za zmenených klimatických pomerov – zvýšenej teploty vzduchu a znížených zrážok. Výstupom modelu sú i jednotlivé zložky odtoku: priamy, hypodermický – pôdný a podzemný odtok.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: klimatická zmena, zrážkovo-odtokový model BILAN, simulácia odtoku

**LONGTERM DEVELOPMENT OF HYDROLOGICAL BALANCE IN THE TOPLA BASIN IN 1961–2015.
PART II: SIMULATION OF THE RUNOFF DEVELOPMENT BY BILAN MODEL IN CHANGED CLIMATE
CONDITIONS.** The second part of the study deals with assessment of the changes in individual runoff components in monthly time step in the Topľa river basin to station Hanušovce nad Topľou. The runoff components were modeled by BILAN model. Model was calibrated and verified during the period 1961/62–2014/15. The calibrated model was used to simulate the runoff changes in the changed climate conditions – increased air temperature and decreased precipitation. Outputs of the model are the individual runoff components: direct runoff, interflow and ground water runoff.

KEY WORDS: climate change, rainfall-runoff model BILAN, runoff simulation

Úvod

Od 80-tych rokov 20. storočia sa s rozvojom výpočtovej techniky a vývojom počítačových modelov začínajú čoraz viac pri bilancii vody v povodí používať hydrologické bilančné modely. Na našom pracovisku má vývoj a používanie zrážko-odtokových modelov dlhú tradíciu. V ÚH SAV sa vývoju zrážko-odtokových modelov venovali predovšetkým Turčan a Svoboda (Svoboda, 1998, 1999). Svoboda (1996) naprogramoval vo FORTRANE konceptuálny model WBMOD so sústredenými parametrami. Tento model bol kalibrovaný pre viaceré povodia tokov SR a využitý pri riešení celého radu hydrologických štúdií (Halmová, 2000 – 2004). Neskôr sa problematikou zrážko-odtokových modelov v ÚH SAV zaoberali Kostka a Holko (Holko a kol., 1997; Kostka, Holko, 2001; Holko, 2001; Kostka

a kol., 2005). Títo autori použili distribuované zrážko-odtokové modely TOPMODEL a WaSiM. Svoboda a Pekárová (1998), Halmová (2000) alebo Miklánek a kol. (2000) použili distribuovaný konceptuálny model AGNPS na simuláciu odtoku v povodí Malej Svinkej. Ďalší model, ktorý bol využitý na našom pracovisku, je semidistribuovaný zrážko-odtokový model HBV. Model HBV použili napr. Pekárová a Velísková (1998), Pekárová a kol. (2005, 2006) a Mitková a Kohnová (2001) pri modelovaní denných prietokov v povodí Ondavy. Jeho verziu HBV-light použili Halmová a Mitková (2002) a Pekárová a kol. (2005a) pri simuláciach prietokov Uhu v Lekárovcích.

Na Slovensku sa dlhé roky modelovaniu a predpovedi odtoku intenzívne venujú na KVHK STU. Na tomto pracovisku bol napr. vyvinutý zrážko-odtokový model KVHK (Kubeš a kol., 2004; Hlavčová a Kohnová,

2005; Szlogay a kol., 2007), alebo model transformácie povodňovej vlny krytom toku MULTI (Szolgay, Kuboš, 2005). Časové zmeny podzemného odtoku v hornej časti povodia Tople modelom BILAN analyzovali Fendeková a kol. (2008, 2010, 2017).

V nasledovnom odseku uvádzame stručný opis koncepciuálnych bilančných modelov, použitých v SR v posledných rokoch.

- **Model WatBal.** Tento model navrhol a použil Petrovič pri bilancii vody v povodí celého Dunaja (Petrovič, 2000, 2006). Pri navrhovaní modelu WatBal Petrovič vychádzal z modelu navrhnutého Yatesom (1994). Model WatBal je konceptuálny model so sústredenými parametrami, ktorý reprezentuje povodie jednou nelineárnomu nádržou. Petrovič pri zachovaní základných zásad modelu WatBal model prepísal v prostredí FORTRAN a EXCEL s tým, že podrobňa optimalizácia pri dodačovaní parametrov modelu využívala procedúru SOLVER v EXCELI.
- **Model KVHK.** Zrážkovo-odtokový bilančný model KVHK vychádza taktiež zo schémy modelu Watbal (Yates, 1994). Bol vytvorený na Katedre vodného hospodárstva krajiny STU v Bratislave. Na rozdiel od pôvodnej verzie modelu Watbal tento model schematizuje povodie dvoma nelineárnymi nádržami. V prvej nelineárnej nádrži prebieha proces akumulácie a topenia snehu a v druhej prebieha simulácia zmeny prvkov hydrologickej bilancie povodia. V modeli je zabudovaný submodel na výpočet potenciálnej evapotranspirácie (Hlavčová a kol., 2008). Pri kalibrácii hydrologickej bilančného modelu je optimalizovaných jedenásť parametrov.
- **Model BILAN** je konceptuálny model, ktorý simuluje hydrologickej bilanciu v dennom alebo mesačnom časovom kroku (opis modelu uvádzajú napríklad Tallaksen a van Lanen, 2004). Tento model je vyvíjaný vo Výskumnom ústavе vodohospodárskom TG Masaryka od 90. rokov 20. storocia. Model schematizuje povodie troma nádržami. V roku 2011 bola pôvodná softvérová implementácia modelu BILAN napísaná v jazyku Pascal, kompletnie prepísané do jazyka C++. Tým sa výrazne zjednodušil ďalší vývoj modelu. Zároveň boli vytvorené dve rozhrania k modelu: grafické užívateľské rozhranie (GUI) založené na multiplatformovej knižnici Qt a balík pre štatistické a programovacie prostredie R. Obe rozhrania sa vzájomne dopĺňajú - GUI sprístupňuje model širokému spektru užívateľov a vďaka vizualizáciám predstavuje efektívny nástroj pre kalibráciu povodí. Model i obe rozhrania sú nadálej udržiavané a rozvíjané podľa potrieb výskumných úloh a požiadaviek užívateľov vo Výskumnom ústavе vodohospodárskom TG Masaryka v ČR.
- **HBV model** je konceptuálny zrážkovo-odtokový model na priebežný výpočet odtoku. HBV model bol vyvinutý začiatkom 70-tych rokov Bergströmom (1992, 1998). Model bol upravený do verzie HBV-

light Seibertom (1998). Vstupnými údajmi sú meraňia zrážok, teplota vzduchu a odhad potenciálnej evapotranspirácie. Časový krok je obvykle 1 deň, ale je možné použiť i kratší časový krok. Pri výpočte akumulácie snehu v povodí je použitá teplota vzduchu. V krajine bez snehovej pokrývky môže byť výpočet topenia snehu vynechaný. Model pozostáva z viacerých submodelov: 1. akumulácie a topenia snehovej pokrývky; 2. výpočtu pôdnej vlhkosti; 3. generovania odtoku a transformácie hydrogramu. Pri použití modelu v povodí je možné spúštať model postupne pre viaceré subpovodia a potom spočítať výsledky pre celé povodie. Kalibrácia modelu, ako aj predpoved, môže byť robená pre každé subpovodie zvlášť. Pre povodia s výraznými rozdielmi v nadmorskej výške, môže byť urobené rozdelenie povodia podľa nadmorskej výšky. Toto rozdelenie ovplyvňuje snehový a pôdno-vlhkostný podprogram. Každá zóna nadmorskej výšky môže byť navyše rozdelená na rôzne vegetačné zóny (napr. zalesnené a odlesnené územia).

Dané modely boli použité pri množstve štúdií, do bežnej posudkovej praxe však neboli na Slovensku doteraz vybratý a zaradený žiadnený model.

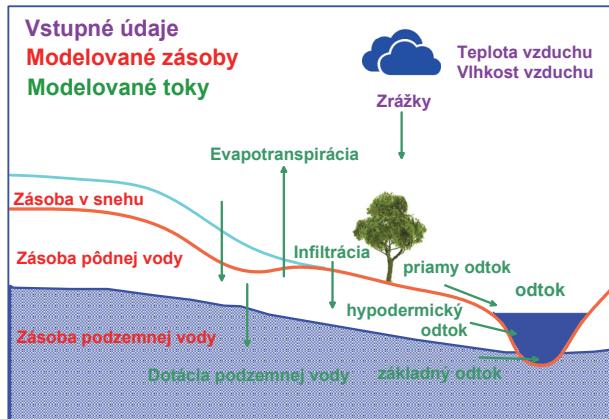
V tejto druhnej časti štúdie sme na zhodnotenie vývoja dlhodobej hydrologickej bilancie vody v povodí Tople použili model BILAN. Model sme kalibrovali v mesačnom kroku. Nakalibrovaný model sme použili na simuláciu odtoku za zmenených klimatických pomerov.

Opis modelu BILAN

Ako už bolo povedané, model BILAN (Kašpárek a Novický, 2004a,b) patrí do skupiny konceptuálnych modelov so sústredenými parametrami. Celé povodie je považované za jeden celok s rovnakými parametrami. Povodie sa schematizuje pomocou troch nádrží (obr. 1). Model BILAN slúži na posudzovanie jednotlivých zložiek vodnej bilancie povodia s mesačným časovým krokom. Štruktúra modelu je formovaná systémom vzťahov popisujúcich základné princípy vodnej bilancie nenasýtenej a nasýtenej zóny, vrátane vplyvu vegetačného pokryvu a podzemnej vody. Vstupmi do modelu sú pozorované mesačné časové rady zrážok, teploty vzduchu a mesačných radov potenciálnej evapotranspirácie, alebo relatívnej vlhkosti. Ak nie sú vstupné rady potenciálnej evapotranspirácie zadané, sú doložené na základe sýtostného doplnku (pre danú teplotu a vlhkosť vzduchu).

Úlohou modelu je simulovať mesačné časové rady hydrologickej premenných a aplikovať ich na celé povodie. Z hydrologickej premenných model simuluje potenciálnu evapotranspiráciu, aktuálnu evaporáciu, infiltráciu do zóny aerácie, priesak do podzemných zvodnených vrstiev, zásoby vody v snehovej pokrývke, v pôde a vodonosnej vrstve (obr. 1).

Celkový odtok (R_{mod}) v mesiaci i je tvorený troma zložkami:



Obr. 1. Schéma povodia v modeli BILAN.
Fig. 1. The scheme of the BILAN model.

1. priamym (*DR*),
2. hypodermickým – pôdnym (*I*),
3. základným (*BF*) odtokom.

$$R_{mod,i} = DR_i + I_i + BF_i \quad (1)$$

Priamý odtok (*DR*) je považovaný za rýchlo odtekajúcu zložku celkového odtoku, ktorá nemá vplyv na evaporáciu a pôdnú vodnú bilanciu. Za hypodermický odtok (*I*) sa považuje prebytok vody pri vodnej bilancii v zóne aerácie. V zimných obdobiach, počas topenia snehu, táto zložka odtoku zahŕňa tiež priamý odtok. Pomalou zložkou celkového odtoku je základný odtok (*BF*), ktorého oneskorenie v povodí môže byť dlhšie ako jeden mesiac.

Zrážkovo-odtokový model s mesačným časovým krokom použitý v tejto práci vychádza zo schému modelu na obr.1. Model vo vertikálnom smere rozlišuje tri úrovne, a to povrch, pôdnú zónu a zónu podzemnej vody. Veľkosti tokov medzi jednotlivými nádržami sú určované algoritmi modelu, ktoré sú riadené ôsmimi voľnými parametrami (Horáček S. a kol., 2009). V závislosti na teplote model odlišuje tri typy režimov (zimný, topenie snehu a letný).

Kalibrácia parametrov

V modeli je definovaných osem voľne meniteľných modelových parametrov. Na kalibracie modelových parametrov sú použité merané rady mesačných odtokov v záverečnom profile povodia.

Medzi parametre modelu patria:

Spa – zásoba pôdnej vody (mm),

Alf – priamý odtok,

Dgm – faktor topenia snehu,

Dgw – faktor pre výpočet množstva vody v tekugej forme na zemskom povrchu v zimnom období,

Mec – parameter riadiaci rozdelenie priesaku, hypo-

- dermickejho odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v podmienkach topenia snehu,
Wic – parameter riadiaci rozdelenie priesaku, hypodermického odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v zimnom období,
Soc – parameter riadiaci rozdelenie priesaku, hypodermického odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v letnom období,
Grd – parameter riadiaci odtok zo zásob podzemnej vody (podzemný odtok).

Tieto parametre sú kalibrované v modeli automaticky použitím optimalizačného algoritmu. Cieľom optimalizácie je dosiahnutie čo najlepšej zhody medzi pozorovanými a simulovanými radmi odtokov. V programu sa dá vybrať optimalizačné kritérium z dvoch možností: stredný kvadratická chyba a priemerná absolútlna chyba z rozdielu pozorovaných a vypočítaných hodnôt.

Hodnoty modelových parametrov získaných z optimalizačného algoritmu môžu byť ovplyvňované maximálnym počtom iterácií vykonaných týmto algoritmom. Predvolená hodnota, ktorá bola odvodená z praktických skúseností je 500. Zvyčajne túto hodnotu nie je potrebné meniť. Maximálny počet iterácií môže byť zmenený.

V prípade, že sme dosiahli optimálne parametre modelu a pristúpime k simuláciám, volíme nulový počet iterácií. Počiatocné podmienky v povodí môžu významne ovplyvniť výsledky simulácie vodnej bilancie, hlavne v prvom roku. Tieto podmienky môžu byť zadané nastavením počiatočnej zásoby podzemnej vody. Predvolená hodnota počiatočnej zásoby podzemnej vody je 50 mm. Táto môže byť zmenená na základe poznania aktuálneho stavu v povodí v prvom mesiaci, alebo odvodením z priebežných simulácií.

Po dokončení optimalizácie je možné zobraziť časové rady bilančných prvkov v nasledovnom poradí:

P (mm) – zrážky na plochu povodia,

R (mm) – pozorovaný odtok v záverečnom profile,

RM (mm) – celkový odtok (simulovaný),

| | |
|----------------|--|
| BF (mm) | – základný odtok (simulovaný), |
| I (mm) | – hypodermický/pôdny odtok, |
| DR (mm) | – priamy odtok, |
| PE (mm) | – potenciálna evapotranspirácia, |
| E (mm) | – územný výpar, |
| SW (mm) | – zásoba vody v snehu, |
| SS (mm) | – zásoba vody v pôde, |
| GS (mm) | – zásoba podzemnej vody, |
| RC (mm) | – dotácia zásob podzemnej vody, |
| T (°C) | – teplota vzduchu na plochu povodia, |
| H (%) | – relatívna vlhkosť vzduchu na plochu povodia. |

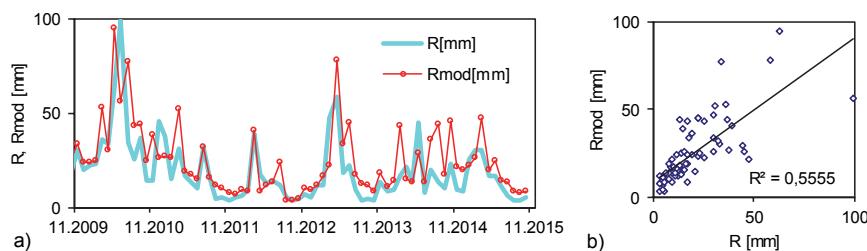
Výsledky

Kalibrácia a verifikácia

Model BILAN sme kalibrovali na údajoch z povodia Tople po Hanušovce nad Topľou na období 1961/62 –

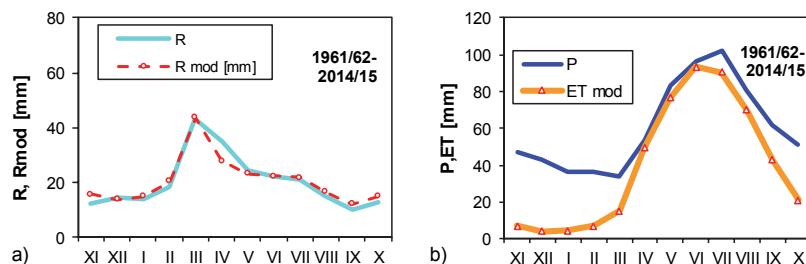
2009/10. Úspešnosť kalibrácie modelu môžeme vizuálne posúdiť na obr. 2. Na obr. 2 sú vykreslené merané a modelované mesačné odtoky za 5-ročné verifikačné obdobie 2009/10 – 2014/15. Koeficient korelácie medzi meranými a modelovanými hodnotami je 0,745 ($R^2=0,56$). Sme si plne vedomí, že korelačný koeficient je pomerne nízky. Vyplýva to z toho, že sme kalibrovali model na dlhom období 49 rokov. V povodí sa menili podmienky – napr. vegetácia. Keby sme vybrali kratšie obdobia, výsledky by boli lepšie, ale mali by sme rôzne sady parametrov. Takto máme jednu sadu parametrov pre celé obdobie, čo bolo našim cieľom. Na obr. 3 vľavo sú vykreslené dlhodobé mesačné merané a modelované odtoky. Vpravo sú vykreslené dlhodobé mesačné zrážkové úhrny a bilančný výpar.

Následne sme model prekalibrovali na celé obdobie pozorovaní. V tabuľke 1 sú uvedené výsledné parametre modelu pre celé obdobie 1961/62 – 2014/15.



Obr. 2a) Priebeh a b) porovnanie mesačných meraných R a modelovaných hodnôt $R\text{mod}$ za obdobie 2009/10 – 2014/15.

Fig. 2a) Course and b) comparison of the monthly observed R and simulated $R\text{mod}$ values, period 2009/10–2014/15.



Obr. 3a) Porovnanie dlhodobých priemerných mesačných hodnôt meraného R a modelovaného $R\text{mod}$ odtoku za obdobie 1961/62 – 2014/15. b) Priebeh dlhodobých mesačných zrážkových úhrnov P v povodí a bilančný výpar $ET\text{mod}$.

Fig. 3a) Comparison of the longterm mean monthly discharge R (measured) and $R\text{mod}$ (modeled), period 1961/62–2014/15. b) Longterm mean monthly precipitation depth P and evapotranspiration $ET\text{mod}$.

Tabuľka 1. Parametre modelu pre obdobia: 1961/62 – 2014/15

Table 1. Model parameters for the period: 1961/62–2014/15

| Obdobie / Period | Spa | Dgm | Dgw | Alf | Soc | Mec | Wic | Grd |
|-------------------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 1961/62 – 2014/15 | 86,15 | 197,8 | 6,808 | 0,00135 | 0,2207 | 0,9892 | 0,1445 | 0,1749 |

Spa – soil water storage/zásoba pôdnej vody (mm), *Dgm* – snow melting factor/faktor topenia snehu, *Dgw* – liquid water during winter factor/faktor pre výpočet množstva vody v tekej forme na zemskom povrchu v zimnom období, *Alf* – direct runoff/priamy odtok, *Soc* – recharge in summer/parametr riadiaci rozdelenie priesaku, hypodermického odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v letnom období, *Mec* – recharge during snow melt/parametr riadiaci rozdelenie priesaku, hypodermického odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v podmienkach topenia snehu, *Wic* – recharge during winter/parametr riadiaci rozdelenie priesaku, hypodermického odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v zimnom období, *Grd* – groundwater discharge/parametr riadiaci rozdelenie priesaku, hypodermického odtoku a dopĺňovania podzemnej vody v zimnom období.

Simulácia jednotlivých zložiek odtoku a zásob vody v povodí Tople

Pomocou modelu BILAN sme modelovali priebeh priemerných mesačných hodnôt jednotlivých zložiek odtoku v povodí Tople podľa parametrov odvodených za celé obdobie 1961/62 – 2014/15. Základný odtok tvorí 50,38 % celkového odtoku, hypodermický 28,16 % a priamy odtok tvorí 21,48 % na celkovom odtoku (obr. 4).

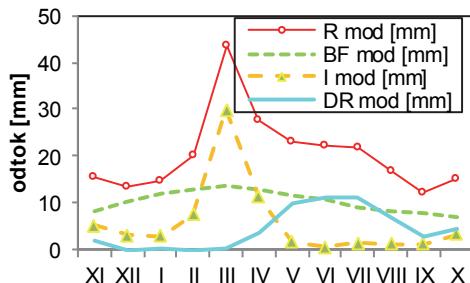
Dlhodobé mesačné zmeny zásob vody v povodí (v snehu SW, v pôde SS a podzemnej vode GS) môžeme zhodnotiť na obr. 5.

Scenáre zmien odtoku v povodí Tople

V prvej časti tejto štúdie sme na základe súboru meračných údajov za 54 rokov odvodili jednoduchý vzťah na odhad zmien odtoku pri zmene klimatických ukazovateľov. Pre povodie Tople sme odvodili viacnásobnou lineárnu regresiou z údajov za obdobie 1961 – 2015 vzťah:

$$R = 43,8 + 0,5036 P - 25,55 T, \quad (2)$$

kde



Obr. 4. Celkový modelovaný odtok R a jeho rozdelenie na základný BF , hypodermický I a priamy odtok DR . Dlhodobé priemerné mesačné hodnoty za obdobie 1961/62 – 2014/15.

Fig. 4. Simulated total runoff R and its separation to base flow BF , interflow I , and direct runoff DR . Long-term mean monthly values, period 1961/62–2014/15.

R – priemerný ročný odtok z povodia Tople;
 P – ročné územné zrážky v povodí Tople;
 T – priemerná ročná teplota vzduchu v povodí.

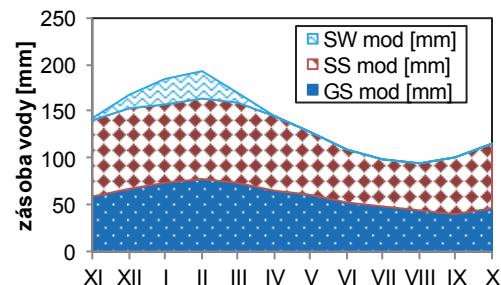
Zo vzťahu (2) vyplýva, že pokles zrážok v povodí Tople o 100 mm spôsobí pokles odtoku o 50 mm. Zvýšenie priemernej ročnej teploty o 1°C má za následok pokles odtoku o 25,5 mm.

Tieto hodnoty môžeme porovnať s výstupmi zo modelu BILAN.

V tejto časti sme pomocou nakalibrovaného modelu BILAN odhadli zmeny odtoku za štyroch scenárov klimatických zmien.

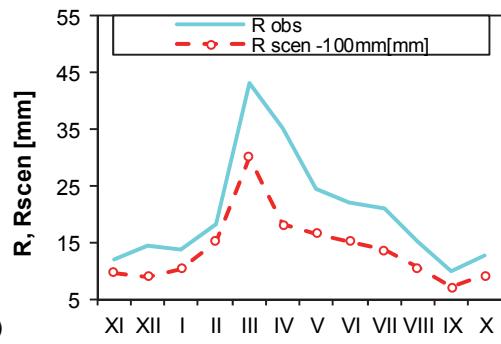
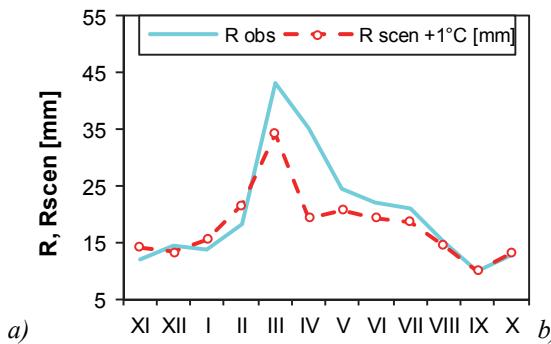
V prvom prípade sme teploty zvýšili o 1°C , v druhom prípade sme zrážky znížili o 100 mm (úmerne v každom mesiaci). Pri stúpnutí teploty vzduchu o 1°C odtok poklesol o 28,7 mm (obr. 6a). Pri poklese zrážok o 100 mm odtok klesne o 77 mm (obr. 6b). Tieto hodnoty sú vyššie, než hodnoty určené z jednoduchého vzťahu (2).

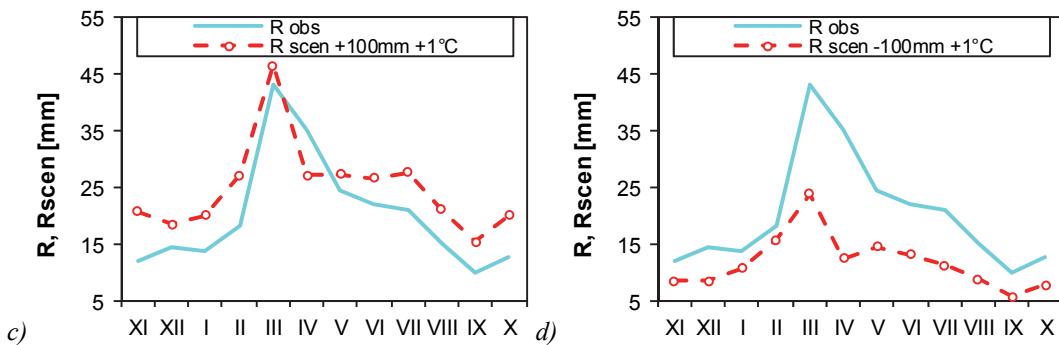
Pri raste zrážok o 100 mm a súčasnom raste teploty vzduchu o 1°C dôjde k nárastu odtoku o 51 mm (predovšetkým v zimnej sezóne, obr. 6c). Najhorší scenár prirodzene predstavuje súčasný pokles zrážok a nárast teploty vzduchu. Na obr. 6d možno vidieť, že odtok klesne o 44 % (o 101 mm).



Obr. 5. Výstup z modelu BILAN pre povodie Tople po Hanušovce nad Topľou, obdobie 1961/62 – 2014/15. Priemerné mesačné hodnoty: SW - zásoba vody v snehovej pokrývke, SS - zásoba vody v pôde, GS - zásoba podzemnej vody.

Fig. 5. Output of the BILAN model (Topľa river basin, closing profile - Hanušovce station, period 1961/62–2014/15). Average monthly values: SW - snow water storage, SS- soil water storage, GS- groundwater storage.





Obr. 6. Scenáre zmien priemerných mesačných hodnôt odtoku pri:
 a) zvýšení teploty vzduchu o 1°C ; b) znížení zrážkových úhrnov o 100 mm za rok; c) zvýšení zrážok o 100 mm a zvýšení teploty vzduchu o 1°C ; d) znížení zrážok o 100 mm a zvýšení teploty vzduchu o 1°C .

Fig. 6. Scenarios of the change in mean monthly discharge in case of:
 a) increase of air temperature by 1°C ; b) decrease of precipitation depth by 100 mm per year;
 c) increase of precipitation by 100 mm and increase of air temperature by 1°C ; d) decrease of precipitation by 100 mm and increase of air temperature by 1°C .

Záver

Hydrologické zrážko-odtokové modely majú veľký význam pri riadení alebo hodnotení konkrétnych situácií v povodiach i na konkrétnych tokoch. Na modelovanie prvkov hydrologickej bilancie v mesačnom časovom kroku sa zvyčajne používajú konceptuálne modely hydrologickej bilancie so sústredenými parametrami. Jeden z takýchto modelov sme použili v predloženej štúdii. Zamerali sme sa na kalibráciu modelu BILAN na údajoch z povodia Tople po Hanušovce nad Topľou na obdobie 1961/62–2014/15. Model pomerne dobre vystihuje merané hodnoty odtoku, avšak pri maximálnych hodnotách dochádza ku väčším odchýlkam.

Nakalibrovaným modelom sme simulovali mesačné odtoky z povodia za zmenených scénarových podmienok zmeny klímy. Najskôr sme mesačné teploty zvýšili o 1°C , potom sme znížili mesačné zrážkové úhrny tak, aby dlhodobý ročný úhrn bol o 100 mm nižší. Nakoniec sme kombinovali zníženie (zvýšenie) zrážok s rastom teploty vzduchu.

Model BILAN veľmi výrazne reaguje na zmeny vstupných klimatických údajov. Zníženie zrážok v dlhodobom priemere o 100 mm by malo za následok zníženie odtoku o 77 mm. Zvýšenie teploty vzduchu v dlhodobom priemere o 1°C prinesie zníženie odtoku o 27 mm. Treba si uvedomiť, že sa jedná o simuláciu matematickým modelom za nezmenených vegetačných podmienok v povodí. Takáto simulácia nemôže zachytiť všetky zmeny v povodí, ktoré môžu v povodí prebiehať pri zvýšení zrážkových úhrnov, alebo zvýšení teploty vzduchu.

Porovnanie dvoch dlhodobých období, ktoré sme prezentovali v prvej časti – chladnejšieho a teplejšieho – však už má reálny základ.

Poděkování

Táto práca bola podporovaná projektom VEGA 2/0009/15, a bola vytvorená realizáciou projektu ITMS 26240120004 Centrum excelentnosti integrovanej protipovodňovej ochrany územia, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- Bergström, S. (1992): The HBV model– its structure and applications, SMHI, 1–32.
- Bergström, S. (1998): A Hydrological Forecasting System (HBV model). Skrátený manuál k programu, SMHI, 30 s.
- Bochníček, O., Mikulová, K., Lapin, M., Gera, M., Melo, M. (2017): Vývoj a prognóza meteorologického sucha na Slovensku In: Hydrologické sucho na Slovensku a prognóza jeho vývoja (Fendeková, Poórová, Slivová, eds.). UK Bratislava, ISBN 978-80-223-4398-5, 51–100.
- Fendeková, M., Fendek, M., Gregová, M., Machlica, A., Stojkovová, M. (2008): Analýza veľkosti a časových zmien podzemného odtoku v hornej časti povodia Tople. Podzemná voda XIV, 2, 129–138.
- Fendeková, M., Danáčová, Z., Gauster, T., Labudová, L., Fendek, M., Horvát, O. (2017): Analysis of hydrological drought parameters in selected catchments of the southern and eastern Slovakia in the years 2003, 2012 and 2015. Acta Hydrologica Slovaca, 18, 2, 135–144.
- Fendeková, M., Ženišová, Z., Demeterová, B., Fendek, M., Fláková, R., Gavurník, J., Krčmář, D., Macura, V., Némethy, P., Slivová, V. (2010): Hydrogeologicke sucho. 1. vyd. Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov, 2010. 190 s. ISBN 978-80-969342-7-0.

- Halmová, D. (2000): Porovnanie modelovaných odtokov z povodia Malej Svinke. Acta Hydrologica Slovaca, ÚH SAV, 1, 5-14.
- Halmová, D. (2000): Vplyv zmien klímy na zabezpečenosť odberu vody z vodného diela Orava. Acta Hydrologica Slovaca, 1, 2, 3-12.
- Halmová, D. (2002): Simulácie celkového objemu nádrží s uvážením rozdielnych scenárov zmeny klímy. Acta Hydrologica Slovaca, 3, 2, 174–184.
- Halmová, D. (2004c): Vplyv potenciálnych klimatických zmien na zabezpečenie požadovanej dodávky vody vodnej nádržou Vihorlat. Acta Hydrologica Slovaca, ÚHSAV, 5, 1, 42–51.
- Halmová, D., Mitková, V. (2002): Simulácia povodne z roku 1998 na rieke Uh zrážko-odtokovým modelom HBV-light. Vodohosp. spravodajca, 45, 7-8, 21–23.
- Hlavčová, K., Kohnová, S. (2005): Návrh rámcových adaptačných opatrení. In: Pekárová, P., Szolgay, J., eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny. Veda – Vydavateľstvo SAV, Bratislava 2005, 419–492. ISBN 80-224-0884-0.
- Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Hlásny, T. (2008): Simulation of hydrological response to the future climate in the Hron river basin. J. Hydrol. Hydromech., 56, 3, 163–175.
- Holko, L. (2001): Testovanie bodovej verzie energeticky založeného modelu akumulácie a topenia snehovej pokrývky UEB v povodí Jaloveckého potoka. Acta Hydrologica Slovaca, 2, 1, 105–112.
- Holko, L., Kostka, Z., Buchtele, J., Lepisto, A. (1997): Runoff modelling in a mountain catchment. Ecohydrological processes in small basins, UNESCO, Technical documents in Hydrology 14, Paris, 169–173.
- Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L., Vizina, A. (2009): Vývoj modelu hydrologické bilance – BILAN. Vodohospodárské technicko-ekonomicke informace, 51, 2–5.
- Kašpárek, L., Novický, O. (2004a): Background information BILAN, CD ROM, 9 str.
- Kašpárek, L., Novický, O. 2004b: Users guide BILAN, CD ROM, 12 str.
- Kostka, Z., Holko, L. (2001): Runoff modelling in a mountain catchment with conspicuous relief using TOPMODEL. J. Hydrol. Hydromech., 49, 3-4, 149–171.
- Kostka, Z., Holko, L., Babiaková, G., Lešková, D. (2005): Simulácia vodnej hodnoty snehu v povodí Popradu v hydrologických rokoch 1999–2005 – vplyv zmeny vegetačných pomerov a predpoveď odtoku počas jarného obdobia. Acta Hydrologica Slovaca, 6, 1, 149–160.
- Kubeš, R., Kumančík, L., Pecušová, Z., Parajka, J., Szolgay, J. (2004): Vplyv zmeny metódy priestorovej interpolácie zrážok na presnosť simulácie odtoku v povodí Hrona. Acta Hydrologica Slovaca, 5, 2, 266–274.
- Mitková, V., Kohnová, S. (2001): Rainfall-runoff simulation using HBV-light model at the Ondava catchment. 19 European Conference of ICID on "Sustainable Use of Land and Water", Brno, 61.
- Pekárová, P., Koníček, A., Miklánek, P. (2005b): Vplyv využitia krajiny na režim odtoku v experimentálnych mikropodiach ÚH SAV. ISBN 80-224-0865-4, Veda, 215 s.
- Pekárová, P., Velísková, Y. (1998): Modelovanie kvality vody v povodí Ondavy. VEDA, vyd. SAV, (ISBN 80-224-0535-3), 254.
- Pekárová, P., Halmová, D., Mitková, V. (2005a): Simulation of the catastrophic floods caused by extreme rainfall events - Uh River basin case study. J. Hydrol. Hydromech., 4, 219–230.
- Pekárová, P., Miklánek, P. (2006): Predpoveď odtoku z topeňia snehu z malého povodia. Acta Hydrologica Slovaca, ISSN 1335-6291, 2006, roč. 7, no. 1, 65–75.
- Petrovič, P. (2000): Dôsledky premenlivosti klímy na hydrologický režim – Nitra po Nové Zámky. In: Možné dôsledky klimatickej zmeny na Slovensku. Zväzok č. 9 Národného klimatického programu SR. Bratislava: MŽP SR a SHMÚ. 58–63.
- Petrovič, P. a kol. (2006): Basin-wide water balance in the Danube river basin. The Danube and its basin – Hydrological monograph Part VIII-3, ISBN 80-89062-49-0, IHP UNESCO & VÚVH, Bratislava, 161 pp.+4 maps.
- Seibert, J. (1998): User's Manual, Uppsala Sweden, 30 s.
- Svoboda, A. (1998): Katastrofálna povodeň na hornom Váhu - pokus o rekonštrukciu. In: Proc: Povodne a protipovodňová ochrana, MP SR, SVP, SF STU, Slovenská vodohospodárska spoločnosť, Dom Techmiky B. Bystrica, 52–55.
- Svoboda, A. (1999): Predpovedný zrážko - odtokový model s aplikáciou v povodí Ipľa. Zborník III. konf. Vplyv antropogénnej činnosti na vodný režim nižinného územia, ÚH SAV, Michalovce, Zemplín. Šírava, máj 1999, 101–108.
- Svoboda, A. (1996): Možný vplyv globálnych zmien klímy na zásobovanie vodou nádrže Vihorlat. Zb. II. Ved. Seminára "Vplyv antropogénnej činnosti na vodný režim nižinného územia", Michalovce, Zemplínska Šírava, ÚH SAV, Bratislava, 104–107.
- Svoboda, A., Pekárová, P. (1998): Katastrofálna povodeň z júla 1998 v povodí Malej Svinke - simulácia jej priebehu. J. Hydrol. Hydromech., Vol.46, 6, 356-372.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Lapin, M., Parajka, J., Kohnová, S. 2007. Vplyv zmeny klímy na odtokový režim na Slovensku. KEY Publishing, 160 str.
- Szolgay, J., Kubeš, R. (2005): Multilineárny model transformácie prietokov v korytách tokov. In: Pekárová, P., Szolgay, J., eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny. Veda , Bratislava, 203–252.
- Tallaksen, L.M, Van Lanen, H.A.J Eds. (2004): Hydrological drought, Processes and Estimation methods for streamflow and groundwater. Developments in water science, 48, Elsevier, Amsterdam, 2004, 579 s. ISBN: 0-444-51688-3.
- Yates, D. (1994): WatBal – An integrated water balance model for climate impact assessment of river basin runoff, Laxenburg, IIASA.

LONGTERM DEVELOPMENT OF HYDROLOGICAL BALANCE IN THE TOPLA BASIN IN 1961–2015
PART II: SIMULATION OF THE RUNOFF DEVELOPMENT
BY BILAN MODEL IN CHANGED CLIMATE CONDITIONS

The second part of the study is devoted to simulation of the monthly runoff from the Topľa River basin and to estimation of its individual components in the monthly time step, during the period 1961/62–2014/15. To assess this aim, we used BILAN model (Tallaksen a van Lanen, 2004, Kašpárek a Novický, 2004a,b). The model simulates hydrological processes by simplifying a catchment into series of connected storage reservoirs, where precipitation, air temperature and humidity are inputs and the output is represented by streamflow at the catchment outlet.

The BILAN model was calibrated with data from the station Hanušovce nad Topľou in the Topľa basin during the period 1961/62–2009/10. The accuracy of the model calibration can be visually checked at Fig. 2. At Fig. 2 there are plotted the measured and modelled mean monthly discharges for the 5-years verification period 2009/10–2014/15. The correlation coefficient between measured and modelled values was 0.745 ($R^2=0.56$). The calibrated BILAN model was used to model the mean monthly values of the individual runoff components in the Topľa basin according to parameters

derived for the whole period 1961/62–2014/15. The baseflow, interflow and direct flow form 50.38%, 28.16%, and 21.48% of the total runoff, respectively (Fig. 4).

The calibrated BILAN model was also used to model the runoff changes according to four climate change scenarios. In the first case the temperatures were increased by 1°C, in the second case the precipitation was decreased by 100mm (proportionally in each month). The increase of air temperature by 0 1°C resulted in the runoff decrease by 28.7 mm (Fig. 6a). In case of precipitation decrease by 100 mm the runoff decreased as well by 77 mm (Fig. 6b). These values are higher than values determined using the simple relation (2). According to the third scenario (precipitation increase by 100 mm and simultaneous increase of air temperature by 1°C) the runoff increased by 51 mm (mainly during the winter season, Fig. 6c). The worst scenario includes the simultaneous decrease of precipitation and increase of air temperature and it will result in runoff decrease by 0 44% (by 101 mm) (Fig. 6d).

Mgr. Marcel Garaj
RNDr. Pavla Pekárová, DrSc.
RNDr. Pavol Miklánек, PhD.
Ústav hydrológie SAV
Dúbravská cesta č. 9
841 04 Bratislava
Slovenská republika
E-mail: pekarova@uh.savba.sk

Doc. RNDr. Ján Pekár, CSc.
Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK
Mlynská dolina
842 48 Bratislava
Slovenská republika