

JIRÍ STEHLÍK

MODELOVÁNÍ PODPOVRCHOVÉHO ODTOKU V POKULMINAČNÍ FÁZI ODTOKOVÉHO PROCESU MODELEM LINEÁRNÍ A NELINEÁRNÍ NÁDRŽE

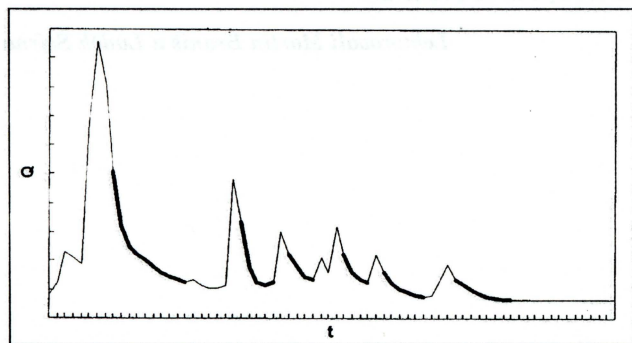
J. Stehlík: *Modelling the subsurface flow component in the runoff recession phase by means of a linear and non-linear reservoir models.* – Geografie – Sborník ČGS, 104, 3, pp. 176 – 187 (1999). – The paper deals with the time variability of the subsurface water storage depletion. The analysis was carried out in a small experimental basin in the Jizera Mountains, Czech Republic. The research focused on the hydrograph falling limbs – recession curves – which were selected from daily runoff series using various selection criteria. These criteria include a requirement that a curve should represent subsurface flow which is not increased by surface runoff. The selected measured recession curves are modelled by means of the exponential and hyperbolic law of depletion. The time variability of the recession curves is quantified by the variability of the modelled recession parameters. 22 variables representing antecedent climate and runoff conditions as well as the conditions during the recession period were defined for the examination of possible causing factors of the recession curve time variability. The correlation analysis and the multivariate statistical methods were applied.

KEY WORDS: Recession curve – water storage – correlation analysis – multivariate statistics.

Studie představuje část doktorandské disertační práce autora (Stehlík 1998c).

1. Úvod

Poklesové větve hydrogramů (obr. 1) reprezentují prázdnění zásob vody v povodí v bezsrážkových obdobích nebo v obdobích s minimálními srážkovými úhrny. Poklesové větve, jejichž spodní části bývají většinou označovány jako výtokové čáry, jsou používány v hydrologii povrchových vod pro předpovídání vodních stavů v obdobích malé vodnosti. V hydrologii podzemních vod se



Obr. 1 – Poklesové větve hydrogramu

pomocí poklesových větví získávají informace o parametrech nasycené zóny (transmisivita, storativita atd.). Analýza poklesových větví je aplikována rovněž při odhadu nelinearity prázdnění vodních zásob. Skutečnosti, že integrací poklesové větve v čase je objem, se využívá pro bilancování zásob vody v povodí. S pokleso-

vými větvemi pracují některé hydrologické modely, které pomocí nich optimalizují své parametry – např. TOPMODEL (Beven, Kirkby 1979). Přehled o teorii a aplikacích poklesových větví podávají např. práce Balco (1990), Hall (1968), Kullman a Petráš (1979), Slepíčka a kol. (1989), Singh a Stall (1971), Tallaksen (1995), Stehlík (1998a).

Výše zmíněné aplikace pracují převážně s poklesovými větvemi průměrovanými za dlouhá časová období. Cílem této studie je detailní prozkoumání příčin časové variability jednotlivých (epizodických) poklesových větví pomocí závislosti intenzity poklesu na hydrologických a klimatických proměnných.

2. Pilotní povodí

Experimentální povodí ve zdrojové oblasti Černé Desné (plocha 4,75 km²) leží ve vrcholové partii Jizerských hor. Jeho střední nadmořská výška je 889 m n. m. Dlouhodobý průměrný průtok činí 0,185 m³.s⁻¹. Geologické podloží je tvořeno biotitickou, hrubě zrnitou nebo porfyrickou žulou jizerského masivu, která snadno podléhá zvětrávání. Nejčastějším půdním druhem jsou mělké, lehké, hrubě zrnité hlinito-písčité půdy typu rašelinných horských podzolů. V terénních depresích se pod vlivem vysoké hladiny podzemní vody vyvíjejí intrazonální půdy. Jedná se o rašelinné gleje, rašelino-humózní gleje a rašeliny (Lesoprojekt 1983). Povodí je zalesněno ze 75 %. Převažují mladé porosty stáří do deseti let.

Zdrojem hydrologických dat je řada průměrných denních průtoků za hydrologické roky 1982 (počátek pozorování) až 1995. Vstupními klimatickými daty jsou denní srážkové úhrny a denní průměrné teploty a vlhkosti vzduchu z klimatické stanice Desná, Souš (770 m n. m.). Hodnoty srážek a teplot byly přepočteny na průměrnou nadmořskou výšku povodí. Byly použity dvě varianty výpočtu: s výškovým gradientem konstantním během celého roku a s výškovým gradientem měnícím se v měsíčním kroku. Gradienty pro přepočet srážkových výšek byly převzaty z prací Kašpárka (1985) a Poláka a kol. (1994), gradienty pro přepočet teplot z publikace Noska a kol. (1972).

3. Metody

3.1 Analytické výrazy

Časová variabilita poklesových větví byla studována pomocí variability parametrů dvou analytických funkcí, které byly proloženy metodou nejmenších čtverců každou naměřenou poklesovou větví. Modelované poklesové větve jsou „ukotveny“ v nejnižším bodě naměřených větví, čímž je zajištěno posílení vlivu základního odtoku na výslednou hodnotu parametru.

Jednoparametrická exponenciální funkce

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{(-K t)}$$

je z bilančního hlediska výsledkem simulace povodí lineární nádrží $Q = K S$, kde S je zásoba vody v povodí, K je koeficient prázdnění a t je čas. Velikost koeficientu prázdnění určuje rychlost poklesu průtoků: čím je K větší, tím je pokles rychlejší. Výhodou exponenciální funkce je skutečnost, že koeficient

prázdnění je nezávislý na počátečním průtoku poklesové větve Q_0 . Z hydraulického hlediska je exponenciála výsledkem linearizované diferenciální Dupuit-Boussinesqovy rovnice popisující nestacionární proudění z nenapjatého kolektoru do toku za Dupuitových předpokladů zanedbatelné vertikální složky proudění a malé změny hladiny podzemní vody vzhledem k celkové mocnosti zvodně. Koeficient prázdnění (parametr) K je funkcí hydrogeologických parametrů zvodněného prostředí, jeho transmisivity, storativity atd.

Dvouparametrická hyperbolická funkce

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \beta t)^\gamma}$$

kde $\gamma = -\frac{n}{l-n}$ je výsledkem simulace povodí nelineární nádrží n -tého řádu:

$Q = l S^n$ (Brutsaert, Nieber 1977), kde l je konstanta. Hydraulicky je dvouparametrická funkce řešením Dupuit-Boussinesqovy rovnice za předpokladu malé výšky hladiny vody v toku a zanedbatelných změn hladiny podzemní vody vůči celkové mocnosti zvodně.

Vyhodnocování variability poklesových větví pomocí exponenciální funkce je snazší, protože je obtížné posoudit v jednom vztahu váhu více parametrů.

3.2 Kvantifikace variability poklesových větví

Variabilita poklesových větví byla kvantifikována pomocí statistického zpracování souboru parametrů modelovaných poklesových větví. Analyzován byl jednak soubor všech poklesových větví získaných z období hydrologických let 1982 – 1995 (158 případů), jednak soubor ze stejné časové periody, ale bez „zimních půlroků“ – s vynecháním měsíců listopad až duben – za účelem odseparování vlivu tání sněhových zásob na průběh poklesů (86 případů). Kromě toho byl zpracován soubor příslušející vždy pouze jednomu měsíci, tj. například soubor parametrů modelovaných poklesových větví za všechny červny, července atd.

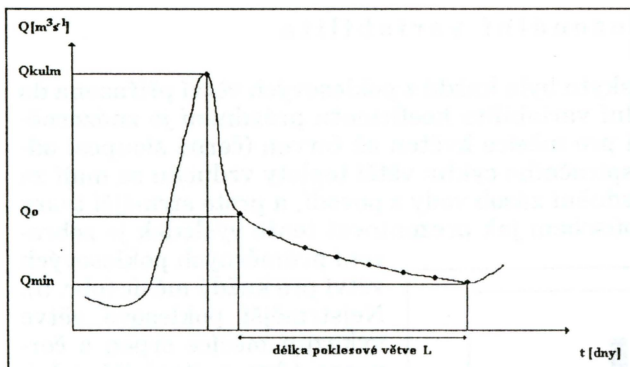
3.3 Zkoumání příčin variability poklesových větví

Příčiny variability poklesových větví byly hledány v závislostech parametrů jejich modelovaných průběhů na charakteristikách poklesových větví, klimatických a dalších proměnných, celkem na souboru 22 proměnných (Stehlík 1997).

Charakteristikami poklesových větví se rozumí: počáteční bod poklesové větve Q_0 , kulminační bod Q_{kulm} , koncový bod Q_{min} a délka poklesové větve L , tj. doba trvání poklesu ve dnech (obr. 2).

Proměnnými charakterizujícími podmínky v době trvání poklesové větve jsou: průměrná denní srážková výška, vypočtená pro dvě varianty vlivu výškového gradientu, tj. konstantního po celý rok (*rok*) a měnícího se v měsíčním kroku (*mes*): $AVG-P(rok)$ a $AVG-P(mes)$, průměrná teplota $AVG-T(rok)$, $AVG-T(mes)$ a průměrná vlhkost vzduchu $AVG-H$.

Proměnné charakterizující podmínky před výskytem poklesové větve jsou vyjádřeny pomocí ukazatelů předcházejících podmínek AXI pro $n = 10$ a 30 dní, kde X představuje měřenou veličinu (srážku – API , teplotu – ATI , vlhkost – AHI):



Obr. 2 – Charakteristiky poklesové větve

$$AXI = \sum_{t=1}^{t=n} \bar{X}_t \cdot C^t$$

kde \bar{X} – průměrná denní hodnota měřené veličiny pro povodí, t – počet dnů počítaných nazpět ode dne příslušejícího Q_0 , C – evapotranspirační konstanta = 0,93 (Hladný 1970).

Tímto postupem byly získány následující proměnné: ukazatelé předcházejících srážek

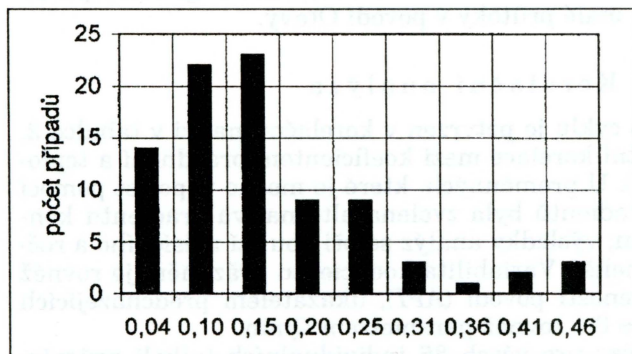
$API(rok)-10$, $API(rok)-30$, $API(mes)-10$, $API(mes)-30$, teplot $ATI(rok)-10$, $ATI(rok)-30$, $ATI(mes)-10$, $ATI(mes)-30$, vlhkost $AHI-10$, $AHI-30$.

Jako dodatečné proměnné byly zavedeny průměrný průtok během trvání poklesové větve $AVG-Q$ a ukazatel předcházejících průtoků pro 10 a 30 dní $AQI-10$ a $AQI-30$.

4. Výsledky a diskuse

V průběhu analýz byly zjištěny následující skutečnosti, kvůli kterým se výzkum soustředil na variabilitu exponenciálních (jednoparametrických) poklesových větví letního cyklu (měsíce květen až říjen): a) exponenciální funkce vystihuje průběh naměřených poklesových větví přesněji než funkce hyperbolická, přestože hyperbolická funkce má více stupňů volnosti; příčiny této skutečnosti spočívají v numerickém postupu při výpočtu parametrů hyperbolické funkce; b) průběh poklesových větví zimního období je ovlivněn táním sněhové pokrývky a nevyjadřuje proto pouze prázdnění podpovrchových vodních zásob. Následující výstupy jsou proto prezentací výsledků získaných analýzou exponenciálních poklesových větví z období květen – říjen za všechny uvažované roky pozorování.

Základní statistické charakteristiky koeficientu prázdnění jsou shrnuty v tabulce 1 a na obrázku 3.



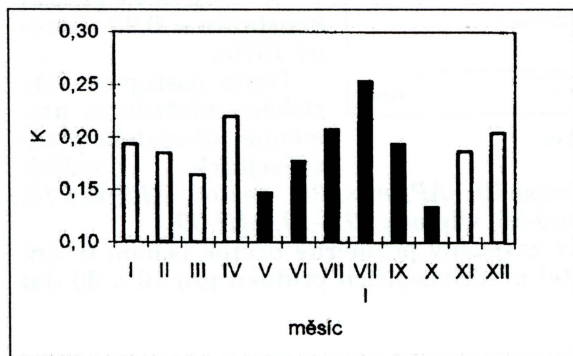
Obr. 3 – Frekvenční analýza koeficientu prázdnění

Tab. 1 – Statistické charakteristiky koeficientu prázdnění (STD – směrodatná odchylka, Cv – variační koeficient)

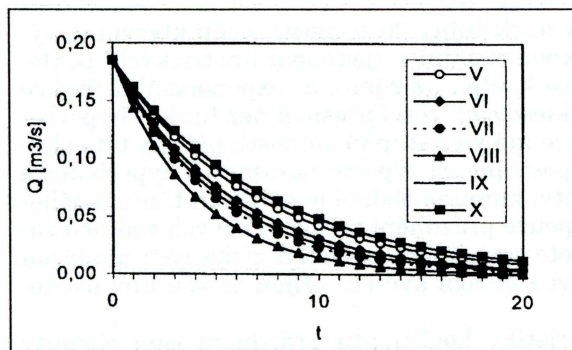
Počet	86
Průměr	0,185
Medián	0,166
Max.	0,516
Min.	0,043
STD	0,100
Cv	0,540

4.1 Sezonální variabilita

Na základě data svého výskytu byla každá z poklesových větví přiřazena do příslušného měsíce. Sezonální variabilita koeficientu prázdnění je znázorněna na obrázku 4. Prázdnění pro měsíce květen až červen (černé sloupce) odráží názorně vliv evapotranspiračního cyklu: větší teploty vzduchu se mají za následek větší rychlosti prázdnění zásob vody z povodí, a proto strmější tvary poklesových větví. Jiným způsobem jak prezentovat tento výsledek je zobrazení průměrných poklesových větví pro každý měsíc (obr. 5).



Obr. 4 – Sezonální variabilita koeficientu prázdnění



Obr. 5 – Průměrné poklesové větve

žení průměrných poklesových větví pro každý měsíc (obr. 5). Nejstrmější poklesové větve vykazují měsíce srpen a červenec (dva nejteplejší měsíce), nejméně strmé říjen a květen (dva nejchladnější měsíce). Poklesové větve jsou modelovány pro dobu trvání 20 dní a počáteční průtok Q_0 rovný dlouhodobému průměrnému průtoku. Průběh zimních poklesových větví ovlivňuje především tání sněhové pokrývky. Proto mají tyto větve velké hodnoty koeficientu prázdnění (bílé sloupce na obr. 4), přestože evapotranspirace je oproti letním měsícům zanedbatelná a koeficient prázdnění by měl být teoreticky malý. Povrchový odtok z tání sněhu je však podstatně rychlejší než odtok podpovrchový vyjádřený exponenciálním zákonem prázdnění. Sezonální variabilitou poklesových větví se zabývali rovněž Hladný a Buchtele (1968), kteří graficko-počet-

ním způsobem předpovídali malé průtoky v povodí Otavy.

4.2 Korelační analýza

Vliv evapotranspiračního cyklu je potvrzen v korelační matici v tabulce 2, kde je dokázána signifikantní korelace mezi koeficientem prázdnění a teplotou během poklesu ($AVG-T$). U proměnných, které je možno vypočíst pomocí dvou různých výškových gradientů byla zvolena alternativa gradientu konstantního během celého roku; výsledky analýz se při použití měsíčního a ročního gradientu v podstatě neliší. Variabilita koeficientu prázdnění je rovněž významně ovlivněna nasycenosti povodí (API), ukazatelem předcházejících teplot (ATI) a na hladině $p = 0,1$ rovněž parametrem Q_{min} .

Výsledky korelační analýzy pro všech 86 individuálních (nikoli průměrných) poklesových větví jsou v tabulce 3. Narozdíl od měsíčních průměrných

Tab. 2 – Korelační koeficienty mezi koeficientem prázdnění K a jednotlivými proměnnými (měsíční hodnoty; * 0,1; ** 0,05; *** 0,01 – závislosti významné na jednotlivých hladinách významnosti)

	AVG-T	AVG-P	AVG-H	AVG-Q	API-10	API-30	ATI-10	ATI-30
K	0,779*	0,047	-0,319	-0,064	0,743*	0,799*	0,953***	0,957***
	AHI-10	AHI-30	AQI-10	AQI-30	Q ₀	Q _{kulm}	Q _{min}	L
K	-0,449	-0,558	-0,106	-0,436	0,634	0,495	-0,758*	-0,712

Tab. 3 – Korelační koeficienty mezi koeficientem prázdnění K a jednotlivými proměnnými (individuální poklesové větve; * 0,1; ** 0,05; *** 0,01 – závislosti významné na jednotlivých hladinách)

	AVG-T	AVG-P	AVG-H	AVG-Q	API-10	API-30	ATI-10	ATI-30
K	0,006	0,126	0,133	0,353***	0,410***	0,420***	0,062	0,141
	AHI-10	AHI-30	AQI-10	AQI-30	Q ₀	Q _{kulm}	Q _{min}	L
K	0,074	0,025	0,245**	0,060	0,431***	0,427***	-0,024	-0,359***

poklesových větví se objevila závislost koeficientu prázdnění na Q_0 a L . Tato skutečnost nemusí být nutně způsobena nepřiléhavostí exponenciálního modelu, ale metodologickými předpoklady, především požadavkem totožné hodnoty minimálního průtoku pro naměřené a modelované poklesové větve (Stehlík 1998d). Přiléhavost modelu je prokázána signifikantní korelací mezi všemi naměřenými a modelovanými průtoky (s velkou rezervou na hladině $p = 0,001$). Závislost na teplotních proměnných zmizela. Potvrzen byl vliv nasycenosti povodí.

4.3 Analýza pomocí vícerozměrných statistických metod

Aby se – za účelem vysvětlení variability koeficientu prázdnění – využila informace obsažená ve všech nezávislých proměnných, bylo by teoreticky možné použít metod vícenásobné regrese. Výsledky by však mohly být ovlivněny relativně vysokými hodnotami korelací mezi některými nezávislými proměnnými. Z toho důvodu se přistoupilo k aplikaci vícerozměrných (multivariačních) statistických metod: analýzy hlavních komponent a faktorové analýzy. Použitím těchto metod se lineární kombinací původních proměnných obdrží nové proměnné – komponenty nebo faktory, které odčerpávají postupně největší část celkové variability souboru proměnných. Tyto komponenty (faktory) jsou navzájem nezávislé. Pomocí komponentní resp. faktorové analýzy dochází k redukci počtu proměnných a k detekování jejich struktury. Rozdíl mezi těmito dvěma metodami spočívá v tom, že v komponentní analýze se předpokládá, že v průběhu výpočtu dochází k využití veškeré informace obsažené ve variabilitě každé proměnné, tj. že celková variabilita daného souboru je zcela vysvětlena vybranými proměnnými. Faktorová analýza naproti tomu využívá pouze tu část variability, kterou má daná proměnná společnou s ostatními.

Tabulka 4 obsahuje procenta celkové variability souboru proměnných a variability koeficientu prázdnění vysvětlené sedmi resp. pěti extrahovanými komponentami (faktory). Celková variabilita souboru je ve všech analýzách

Tab. 4 – Procento celkové variability souboru a variability koeficientu prázdnění K vysvětlené sedmi, resp. pěti extrahovanými komponentami (faktory; * analýza hlavních komponent, ** faktorová analýza)

Metoda	AHK*		FA**	
Počet komponent (faktorů)	7	5	7	5
Procento celkové variability (%)	93	86	89	82
Procento variability K (%)	89	64	52	27

Tab. 5 – Komponentní (faktorové) váhy pro koeficient prázdnění

Metoda	AHK		FA	
Komponenta (faktor)	7	5	7	5
API a průtoková (Q_0 , AVG-Q, AQI)	–	0,46	–	–
API a průtoková (Q_0 , AQI-10)	0,49	–	0,45	0,39
Doplňková průtoková (AVG-Q, AQI-30)	–0,03	–	0,05	0,18
Délka poklesové L	0,78	0,59	0,56	–
Teplotní (AVG-T, ATI)	–	0,18	–	0,19
ATI	0,04	–	0,07	–
AVG-T	0,10	–	0,04	–
Vlhkostní (AVG-H, AHI)	0,08	–0,19	0,02	–0,21
AVG-P	–0,06	–0,13	–0,02	0,01

vysvětlena z více než 80 %. Rozdíly v míře objasněnosti variability koeficientu prázdnění mezi analýzou hlavních komponent a faktorovou analýzou jsou způsobeny rozdílnými metodologickými předpoklady. Z výsledků analýz vyplývá, že v případě sedmi extrahovaných komponent resp. faktorů je variabilita koeficientu prázdnění vysvětlena z 89 %, resp. z 52 %. U pěti extrahovaných komponent, resp. faktorů je tato variabilita vysvětlena z 64 %, resp. z 27 %. Faktorová analýza signalizuje, na variabilitu koeficientu prázdnění působí – kromě souboru 22 (často vzájemně korelovaných) proměnných – pravděpodobně ještě dodatečné vlivy. V úvahu přichází především vliv dynamiky nasycené a nenasyčené zóny, která v povodí nebyla ve zkoumaném období monitorována.

Komponentní resp. faktorové váhy koeficientu prázdnění, které se rovnají korelaci mezi komponentami (faktory) a koeficientem prázdnění, jsou uvedeny v tabulce 5. Ve třech ze čtyř analýz reprezentují dominantní komponenty (faktory) nasycenost povodí (ukazatel předcházejících srážek API), průtokové proměnné a délku trvání poklesu (dvě největší váhy jsou zvýrazněny). Analýza pro pět extrahovaných faktorů je kvůli nízké objasněnosti variability koeficientu prázdnění (27 %) obtížně interpretovatelná. Vliv evapotranspirace na variabilitu koeficientu prázdnění lze velmi slabě detekovat pro variantu pěti extrahovaných komponent.

5. Závěry

Průběh poklesových větví hydrogramů lze lépe modelovat jednoparametrickou exponenciální funkcí než dvouparametrickou hyperbolickou funkcí. Proces prázdnění podpovrchových zásob vody v povodí reprezentují pouze ty poklesové větve, které nenastaly v důsledku tání sněhových zásob v zimních obdobích. Proto se výzkum soustředil na modelované exponenciály letních období.

Za účelem detekování potenciálních faktorů způsobujících časovou variabilitu koeficientu prázdnění bylo definováno 22 proměnných reprezentujících ukazatele předcházejících klimatických a hydrologických podmínek a podmínek v době trvání poklesové fáze. Kromě proměnných příslušejících individuálním poklesovým větvím byly provedeny analýzy rovněž pro průměrné měsíční hodnoty proměnných za účelem detekce potenciálního vlivu evapotranspiračního cyklu.

Z korelační analýzy vyplynuly následující nejdůležitější závěry:

1. Signifikantní vliv evapotranspiračního cyklu byl detekován pro průměrné poklesové větve letního období s časovým krokem jednoho měsíce. Intenzita prázdnění podpovrchových zásob vody a průměrné měsíční teploty jsou navzájem korelovány, přičemž vyšší teploty mají za následek rychlejší prázdnění zásob a tudíž větší strmost poklesových větví. Vliv nasycenosti povodí reprezentovaný ukazatelem předcházejících podmínek je obdobný.
2. U individuálních poklesových větví není pravděpodobně vliv evapotranspirace signifikantní. Významný je účinek nasycenosti povodí. Hodnota koeficientu prázdnění závisí rovněž na počátečním průtoku poklesové větve a její délce, což je pravděpodobně způsobeno metodikou výpočtu koeficientu prázdnění.

Výše zmíněné poznatky však mohou být ovlivněny poměrně silnými vzájemnými korelacemi mezi jednotlivými proměnnými. Z toho důvodu byly následně aplikovány metody vícerozměrné statistiky – analýza hlavních komponent a faktorová analýza, které vedly mimo jiné k následujícím zjištěním.

1. Potvrzena byla dominantní role nasycenosti povodí na časovou proměnlivost poklesových větví. Signifikantní je rovněž vliv počátečního průtoku a délky poklesové větve.
2. Z výsledků faktorové analýzy plyne, že proces prázdnění podpovrchových vodních zásob je pravděpodobně ovlivňován rovněž jinými faktory než těmi, které je možno vyjádřit pomocí souboru 22 proměnných. Významnou roli bude zřejmě hrát i dynamika nasycené a nenasyčené zóny, která v povodí nebyla ve zkoumaném období monitorována.

Přestože má studie především metodický charakter, je možno se rovněž ptát, jaké nové poznatky o zkoumaném povodí vyplývají z provedených analýz. Především je to důkaz o funkci zvětralínového pláště v zimním období. Ten v zimě promrzá, zabráňuje infiltraci a tudíž nedochází k dotaci zásob podpovrchových vod. Většina průtokových vln v zimním období je vyvolána táním sněhové pokrývky a je tedy tvořena převážně povrchovým odtokem. Průměrné měsíční zimní poklesové větve by teoreticky měly vykazovat nejmenší hodnoty koeficientu prázdnění a tedy nejméně strmé poklesy, protože evapotranspirace je oproti letním měsícům zanedbatelná. Velké hodnoty koeficientu prázdnění, které vedou na velkou intenzitu poklesu některých těchto větví, jsou důkazem toho, že tyto větve nevyjadřují prázdnění zásob podpovrchových vod, pro které platí exponenciální zákon.

Z výsledků výzkumu je dále zřejmé, že hladina podzemní vody probíhá mělce pod povrchem terénu. Kdyby tomu tak nebylo, nebyly by měsíční poklesové větve ovlivněny sezónálním evapotranspiračním cyklem, protože jeho vliv by se v případě hlouběji zakleslé hladiny podzemní vody nemohl projevit. Pouze mělká hladina podzemní vody může ve vegetačním období dotovat výpar a transpiraci rostlin.

Z analýzy poklesové fáze odtoku v pilotním povodí Černé Desné vyplynuly i poznatky obecnějšího charakteru, ke kterým je možné zařadit i domněnky o průběhu zkoumaného jevu v odlišném přírodním prostředí, popřípadě v jiných klimatomorfogenetických zónách.

Významný vliv nasycenosti povodí na variabilitu prázdnění podpovrchových zásob vody znamená, že dynamiku prázdnění vodních zásob ovlivňuje charakter půdního pokryvu, geologického podloží a rovněž – jak již bylo zmíněno – hloubka hladiny podzemní vody.

V oblastech s hlubším oběhem podzemních vod (např. v povodích s mocnými polohami propustných křídových pískovců) je pravděpodobné, že hodnoty koeficientu prázdnění budou menší, protože tento koeficient souvisí s průměrnou dobou zdržení vody v nádrži podzemní vody: čím je doba zdržení delší, tím je koeficient prázdnění menší. Kromě toho v takových oblastech charakterizuje – z hydraulických příčin – jednoparametrická exponenciální funkce proces prázdnění ještě přiléhavěji. Méně výrazné bude pravděpodobně ovlivnění klimatickými poměry. Kvůli větší zakleslosti hladiny podzemní vody nebude zřejmě možné detekovat sezónní změny poklesových větví.

Nelze vyloučit, že významnější roli s ohledem na variabilitu poklesových větví bude hrát rovněž mocnost zvodněné vrstvy. Pokud je odtok tvořen převážně podpovrchovou složkou, potom větší mocnost zvodněné vrstvy může mít za následek menší variabilitu, protože ztráty evapotranspirací nebudou z celkového odtoku tvořit proporčně tvořit tak velký podíl.

Rovněž charakter reliéfu, především jeho sklonitostní poměry, má bezesporu vliv na dynamiku prázdnění zásob podpovrchových vod. V případě obdobných geologických, půdních a vegetačních poměrů bude rychlejší prázdnění podpovrchových vodních zásob (a tedy větší hodnoty koeficientu prázdnění) nastávat v povodích s většími sklony svahů.

Literatura:

- BALCO, M. (1990): Malá vodnost slovenských tokov. Veda, Bratislava, 261 s.
- BEVEN, K. J., KIRKBY, M. J. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., 24, č. 1, s. 43-69.
- HALL, F. R. (1968): Base flow recessions – a review. Water Resour. Res., 4, č. 5, s. 973-983.
- HLADNÝ, J., BUCHTELE, J. (1968): Předpovědi odtoku v bezsrážkových obdobích. Sborník prací HMÚ, 12, Praha, s. 79-151.
- HLADNÝ, J. (1970): Hydrologická prognóza. HMÚ, Praha, 115 s.
- KAŠPÁREK, L. (1985): Charakteristiky řad průtoků vody, jejich časové a prostorové extrapolace. Výzkumná zpráva. ČHMÚ, Praha, 135 s.
- KULLMAN, E., PETRAŠ, I. (1979): Výtokové poměry prameňov a ich vzťah k horninovému prostrediu. Zborník prác Hydrometeorologického ústavu, 13, Alfa, Bratislava, 308 s.
- Lesoprojekt (1983): Pedologický rozbor vybraných lokalit Jizerských hor. Brandýs nad Labem.
- NOSEK, M. (1972): Metody v klimatologii. Academia, Praha, 316 s.
- POLÁK, M., KAŠPÁREK, L., KREJČOVÁ, K. (1994): Hydrologická bilance na Černé Nise a Černé Desné. Výzkumná zpráva. ČHMÚ a VÚV TGM, Praha, 30 s.
- SINGH, K. P., STALL, J. B.: (1971): Derivation of base flow recession curves and parameters. Water Resour. Res., 7, č. 2, s. 292-303.

- STEHLÍK, J. (1997): Influence of climate factors on the variability of recession curves. Groundwater Depletion in Basin Regions. VITUKI, Budapest, s. 103-104.
- STEHLÍK, J. (1998a): Současný stav metodologie poklesové fáze odtoku. Práce a studie ČHMÚ, č. 27, Praha, 27 s.
- STEHLÍK, J. (1998b): Analýza variability poklesové fáze odtoku multivariačními metodami. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 46, č. 2, Bratislava, s. 144-164.
- STEHLÍK, J. (1998c): Variabilita poklesové fáze odtoku. Doktorandská disertační práce. Katedra fyzické geografie a geokologie, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 144 s.
- STEHLÍK, J. (1998d): The dynamics of the subsurface water storage depletion in a small experimental basin. Proc. Catchment Hydrological and Biogeochemical Processes in Changing Environment. Conference and Seventh General Assembly of the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB). Praha, s. 155-159.
- SLEPIČKA F., SARGA K., ANTON Z. (1989): Moderní hydrologické metody pro hydrogeologické testování a bilancování. MON, Praha, 317 s.
- TALLAKSEN, L. M. (1995): A review of baseflow recession analysis. Journal of Hydrology, č. 165, s. 349-370.

Summary

MODELLING THE SUBSURFACE FLOW COMPONENT IN THE RUNOFF RECESSON PHASE BY MEANS OF A LINEAR AND NON-LINEAR RESERVOIR MODEL

A recession curve (hydrograph falling limb) represents the depletion of groundwater storage within the basin. The paper deals with a recession curve analysis aimed at examining factors causing its time variability.

The recession curve is frequently applied in surface water hydrology for forecasting of low flows and relevant water stages and thus it can provide useful information for the water management sector, i.e. for water supply industry, water power generation, water transportation, determination of ecological flows, etc. In groundwater hydrology, the recession curve provides information on parameters of the saturated zone and its water storage capacity. Analysis of recession curve parameters can be applied to estimating linearity or non-linearity of the depletion process and behaviour of the aquifer. An integration of the recession curve in time produces runoff volume, which can be used for water balance analyses, for which various water balance models have been developed. These models frequently use the theory of the outflow from linear or non-linear reservoirs for the description and analysis of individual runoff components and time lags between them. Parameters of these models are often derived from a master recession curve of the basin.

In total, 158 recession curves have been selected from daily runoff series of hydrological years 1982 – 1995 using such selection criteria, including a requirement that a curve should preferably represent base flow (groundwater depletion). Of the selected curves, 86 come from the summer season (May to October) and are not influenced by snowmelt.

The variability of the recession curves was studied using parameters of analytical functions, which were fitted by the least-square method, modified by applying weights giving preferences to the base flow in affecting the shape of the fitted curve. Analytical functions were used as follows:

One-parameter exponential function

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{(-K t)}$$

which, in terms of the water balance approach, simulates the basin response by the outflow $Q = K S$ from a linear reservoir, where S is a water storage in the reservoir and K is a recession constant.

Two-parameter hyperbolic function

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \beta t)^\gamma}$$

where $\gamma = -\frac{n}{1-n}$ is derived from the equation $Q = K S^n$ representing the outflow from a non-linear reservoir of n order.

The variability of the recession curve can be analysed more easily by means of the exponential function having one parameter. In addition to the fact that it is always difficult to separate relative importance of more parameters, the parameter of the exponential function is independent of the initial discharge Q_0 of the recession curve. Therefore, the recession curve variability was mainly analysed using the exponential function parameter.

For the examination of possible causing factors of the recession curve variability, 22 variables representing antecedent climate and runoff conditions as well as the conditions during the recession period were selected.

In addition to the variables defined for each recession period, analyses were also performed using monthly values of the variables with intention to allow detection of potential influence of the evapotranspiration cycle. First both sets of recession curve parameters were analysed; subsequently analysis was conducted on recession curves from the summer season not influenced by snowmelt.

The main conclusions resulting from the analysis are as follows:

A significant effect of the evapotranspiration cycle can be substantiated for the master recession curves averaged for a time step of one month. The intensity of basin depletion and average air temperature during the recessions are closely correlated in the summer season, when higher air temperature is reflected in an accelerated depletion of water from the basin and thus in higher section of relevant recession curve. Similar is the influence of the basin saturation represented by the index of antecedent conditions.

For individual recession curves, the effect of the evapotranspiration cycle is not significant, while the saturation of the basin is a more important variable. The recession constant depends also on the initial discharge and on the duration of the recession. This is probably caused by the method of the recession constant computation.

However, the above conclusions could be affected by relatively close inter-correlations among some of the selected variables. Therefore, multivariate methods, namely principal components analysis and factor analysis, were applied in further research. From this research, the following was concluded:

The important influence of the basin saturation on the time variability of recession curves was confirmed. The role of the initial discharge and duration of the recession is also significant.

The factor analysis results show that the subsurface water depletion from the basin is probably affected also by some other factors that have not been involved into the selected set of 22 variables. Significant is probably the dynamics of the saturated and unsaturated zone, which was not observed in the basin in the period of investigation.

Although this study primarily aims at developing of new methodology, some information also results from the research concerning the environment of the experimental basin. Especially the behaviour of the weathering mantle in the winter season was confirmed by means of the recession curve analyses. The mantle gets frozen, blocks infiltration and therefore the subsurface water storage is not replenished. Most discharge waves in the winter season result from snowmelt. For the most part they are formed by the surface runoff. This is proved by the shape of the modelled monthly master recession curves in winter. They have high values of the recession constant which results in the steep shape of the curves. So these curves are not less steep than these from the summer season as it could be expected regarding the influence of evapotranspiration only.

The shallow position of the groundwater level in the basin was proved by the analyses. Only under this condition the monthly master recession curves could be affected by the evapotranspiration cycle because its influence could not be detected in the case of deeper groundwater level. Only shallow groundwater level can contribute to the evaporation and plant transpiration.

The results of the recession curves analysis in the Černá Desná Basin evoke also some general ideas concerning runoff and associated processes under different natural conditions.

Reliability of possible generalisation of the conclusions made in the Černá Desná Basin depends mainly on representativeness of its physical and geographical characteristics. However, the following can be concluded from the analyses and theoretical considerations made in carrying out the study.

The research substantiated the fact that moisture conditions (expressed as antecedent precipitation index) affect significantly the intensity of depletion processes. The dynamics of the depletion is therefore influenced by the type of the soil layer and geological structure of the bedrock. In areas with deep groundwater circulation (e.g. in deep aquifers formed by

Cretaceous sandstone), the recession constant will probably be lower and less dependent on actual climate conditions. This recession constant is related to mean detention time of water in the aquifer and it decreases with an increase in the detention time. It can also be anticipated that one-parameter exponential function describes more accurately the hydraulics of the deep aquifers.

The recession constant increases probably also with an increase in the slope conditions in the basin as a result of more rapid depletion of the water storage in layers that are close to the land surface.

Fig. 1 – Recession curves

Fig. 2 – The characteristics of the recession curve

Fig. 3 – Frequency analysis of the recession constant

Fig. 4 – Seasonal variability of the recession constant

Fig. 5 – Master recession curves

(Pracoviště autora: oddělení experimentální hydrologie, Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4.)

Do redakce došlo 26. 10. 1998

Lektorovali Josef Hladný a Josef Buchtele