SEPARÁCIA HYDROGRAMU POMOCOU PARAMETROV REPREZENTATÍVNEJ VÝTOKOVEJ ČIARY

HYDROGRAPH SEPARATION INTO FLOW COMPONENTS USING PARAMETERS OF THE MASTER RECESSION CURVE

Peter Malík

ABSTRACT

Presented hydrograph separation principle is based on several exponential and linear equation members superposition. It describes the quantitative behaviour (discharge) of hydrologic system (catchment) or aquifer (spring) by set of unique, constant values of starting discharges Q_0, as well as set of unique recession coefficients (α or β) for each detected flow component. The main idea behind the method is based on a simplified understanding of reality: the same discharge should reflect the same water saturation (piezometric) level in the system. Hence, the separation method requires detailed recession curve studies of each hydrologic/aquifer system to create really representative, mathematically described master recession curve. In the process of hydrograph separation, each measured discharge value is understood as a result of superposition of one or several laminar flow components (exponential sub-regimes) and eventually also turbulent ones, expressed by linear equation members. Every measured discharge value Q_t is then determined just by a representative time t – theoretically elapsed time from the overall maximum discharge value Q_{max}. Subsequently, amounts discharged in different flow components can be calculated using the t value in their individual equations. As the exponential equation has no analytical solution, each discharge value Q_t has to be solved by iteration process.

KEY WORDS

Hydrograph separation, recession curve, recession parameters, flow components, iteration solution

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Separácie hydrogramu, výtoková čiara, výtokové parametre, zložky odtoku, riešenie iteráciou

ÚVOD

Postupy, používané pri separácii hydrogramu na jednotlivé zložky odtoku sa používali najmä na oddelenie základného odtoku, resp. odtoku podzemnej vody, hypodermického / podpovrchového odtoku a povrchového odtoku. V hydrogeologických prácach vystupujú zvyčajne zložky podzemného/základného odtoku (odtoku podzemnej vody) a hypodermického / podpovrchového odtoku. Analýza poklesávajúcich častí hydrogramov aplikovaná na odlíšenie jednotlivých zložiek odtoku v rámci celého hydrogramu bola často realizovaná grafickými metódami (Kulandaiswamy, Seetharaman, 1969; Linsley et al., 1982; Bates, Davies, 1988). Jedným z postupov používaných veľmi často na Slovensku je metóda vyčlenenia podzemného odtoku vedením plynulej čiary spájajúcej minimá prietokov, ktoré nastanú po jednotlivých prietokových vlnách, ktorú navrhol Foster (1948). Modifikáciu Fosterovej metódy s cieľom jej objektivizácie navrhol Gedeon (1999), ktorý pokladá za optimálne priblíženie skutočnému priebehu zmien podielu podzemného odtoku kĺzavé priemery prietokov. Ako to už bolo naznačené, grafické metódy separácie hydrogramu bývajú zvyčajne subjektívne a ich reprodukovateľnosť je nízka.

Metódy stanovujúce podiel podzemného odtoku s použitím štatistických postupov odvodzujú zvyčajne hodnotu tohto podielu z minimálnych prietokov na povrchových tokoch. Jedným z takýchto postupov je stanovenie podielu podzemného odtoku na povrchovom odtoku ako aritmetického priemeru z priemerných denných prietokov z obdobia 30 po sebe nasledujúcich dní s najnižšími prietokmi v jednom roku (Castany et al., 1970) – metóda je často aplikovaná aj slovenskými autormi. Z hodnôt najmenších priemerných denných

RNDr. Peter Malík, CSc.
Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, oddelenie hydrogeológie a geotermálnej energie, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava, peter.malik@geology.sk

prietokov v mesiaci z dlhšieho časového radu vychádza aj metóda grafoanalytického postupu, kde sú tieto vstupné údaje vzostupne usporiadané, a ktorú Kille (1970) navrhol ako korekciu separačných metód Wundta (1953, 1958) s cieľom vylúčenia ovplyvnenia separovaného odtoku vysokým podielom hypodermického a povrchového odtoku. Fendeková a Fendek (1999) upozornili na časté nesprávne aplikovanie Killeho (1970) metódy v našej hydrogeologickej praxi a na potrebu využitia exponenciálnej krivky iba v tej časti množiny hodnôt minimálnych mesačných prietokov, kde sa prejavuje výrazný odklon grafu nameraných hodnôt od vyrovnávacej priamky preloženej dolnou časťou množiny týchto bodov. Metódu členenia prietokov s využitím pozorovania hladín podzemnej vody navrhli Kliner a Kněžek (1974). Metóda vychádza z porovnania výsledkov sledovania povrchového prietoku a úrovní hladín podzemných vôd dotujúcich povrchový tok. Podrobnejší opis metódy uvádza Kněžek (1988), v praxi Českého hydrometeorologického ústavu sa tiež používa zjednodušený postup, pri ktorom sa na osi y vynášajú namiesto rozdielov hladín iba stavy hladín. V tejto modifikácii nemožno používať objekty, ktoré sú v priamej hydraulickej súvislosti s povrchovým tokom a možno tu použiť aj výdatnosti prameňov (Kessl, Kněžek, 2000).

Matematické metódy separácie hydrogramu, aplikované najmä na vyčlenenie podzemného odtoku (často označovaného ako základný odtok/baseflow) si našli svoje uplatnenie s postupom rozširujúceho sa využívania výpočtovej techniky (napr. Chapman, 1999; Wittenberg, Sivapalan, 1999). Pereira (1977) aplikoval „metódu najmenších štorcov“, založenú na riešení dvoch exponenciálnych rovníc, aby získal charakteristiku podzemného odtoku v malých horských povodiach. Voľne prístupný a šíriteľný program na separáciu hydrogramu rieky, ktorý bol vyvinutý na Geologickej službe USA (USGS Hydrograph Separation Program – HYSEP; Sloto, Crouse 1996) počíta základný odtok z hodnôt celkového odtoku aplikáciou postupu fixného intervalu, kĺzavého intervalu alebo lokálneho minima (Pettyjohn, Henning, 1979).

Metódy seprácie hydrogramu pomocou metód, ktoré prezentovali James a Thompson (1970), Browne (1978), Pereira a Keller (1982) sa sústreďujú na pokles základného (podzemného) odtoku analytickými postupmi, avšak stanovujú zvyčajne iba jeho strednú hodnotu a nepokúšajú sa o jeho spojité stanovenie v každom momente. Výtokové čiary ako základ stanovenia hodnôt podzemného a hypodermického odtoku aplikoval Rambert (1971). Automatizované procesy pre stanovenie podzemnej zložky odtoku, analýzy výtokových čiar a ich separačnej aplikácie vo forme reprezentatívnej výtokovej čiary („master recession curve“) postupne hodnotili Nathan a McMahon (1990), Lamb a Keith (1997), Rutledge (1998) a Posavec et al. (2006). Prehľad používaných metód, využívajúcich výtokové čiary (v staršej slovenskej hydrogeologickej literatúre označovaných tiež ako čiary vyprázdňovania) uvádza Tallaksen (1995).

Väčší problém predstavuje interpretácia (a separácia) vo vzostupnej časti čiary prietokov. Bod ukončenia prejavov priameho povrchového toku definovaný prechodom transformovanej čiary poklesu prietokov do koncovej priamky sa rôznymi spôsobmi spája s bodom hydrogramu na začiatku vzostupu prietokovej vlny (napr. Ineson, Downing, 1964; Ward, 1967; Appleby, 1970; Balek, 1989). Najjednoduchšie priblíženie predpokladá stotožnenie času kulminácie prietokovej vlny s časom kulminácie podzemného odtoku. Kullman et al., (1997) uvádzajú, že v malých povodiach, kde je retardácia podzemného odtoku za povrchovým veľmi malá, možno chybu vznikajúcu časovým rozdielom kulminácie povrchového a podzemného odtoku zanedbať. Metódu vyčlenenia podzemného odtoku na základe priamky charakterizovanej koeficientom α_1 (výtokový parameter – koeficient α charakterizujúci koncovú priamku semilogaritmickej transformácie hydrogramu) navrhol Kullman (1997). Podiel podzemného odtoku stanovuje z plochy vymedzenej po prenesení čiary odpovedajúcej hodnote α_1 zo semilogaritmického grafu do grafu s lineárnym vynesením prietokov na osi poradníc y. Výtokové parametre, vystupujúce ako konštanty/koeficienty α v exponente rovnice opisujúce výtokovú čiaru, boli v staršej literatúre definované ako koeficienty vyprázdňovania / *recession constants* (Hanzel et al., 1998).

Separácia hydrogramu krasových prameňov býva zväčša založená na analógii s povrchovými tokmi. Základný odtok z hornín s krasovým alebo krasovo-puklinovým typom priepustnosti je spájaný s odtekaním podzemnej vody z mikropuklín alebo klastických sedimentov vyplňujúcich krasové kanály. Povrchový odtok a hypodermický odtok („interflow“), charakteristické pre hydrogram rieky, môžu mať svoj analóg v novoinfiltrovanej vode z nedávnej infiltračnej udalosti a/alebo vody dlhodobo prítomnej vo zvodnenci, a vytláčanej rýchlo prenášaným tlakovým hydraulickým účinkom takejto infiltračnej udalosti. Z tohto dôvodu je pre hodnotenie kvality i kvantity krasovej podzemnej vody rovnako dôležitá separácia hydrogramu na základe doby zdržania sa vody vo zvodnenci (Kresic, 1993).

Pre separáciu jednotlivých zložiek hydrogramu krasových prameňov navrhol Drogue (1972) aplikáciu typovej Boussinesquovej hyperbolickej funkcie s hodnotou exponentov 0,5; 1,5 a 2,0. Yevjevich (1976) aplikoval schematickú dekompozíciu jednotkového hydrogramu krasového zvodnenca, s niekoľkými subrežimami ponímanými ako odozvy na infiltračné impulzy: veľmi pomalá odozva najjemnejších puklín a ílovito-prachovitých sedimentov; pomalá odozva prachovitých a piesčitých sedimentov a stredne otvore-

ných puklín; stredná až rýchla odozva piesčitých až štrkovitých sedimentov a stredne otvorených puklín; rýchla odozva veľkých krasových kanálov a veľmi otvorených puklín. Na Slovensku boli v prácach Kullmana a Petráša (1979) a Kullmana (1990) charakterizované a kategorizované jednotlivé pramene podľa subrežimov prítomných v analyzovaných výtokových čiarach. Vyčlenenie laminárnych subrežimov bolo prvý raz opísané v práci Kullmana a Petráša (1977), spôsob detekcie a matematického vyjadrenia turbulentných subrežimov opísal Kullman (1983). Neskôr boli podľa prítomnosti a charakteru subrežimov vyčlenených vo výtokových čiarach prameňov charakterizované aj stupeň dezintegrácie/skrasovatenia horninového prostredia, resp. charakter zraniteľnosti podzemných vôd v infiltračných oblastiach týchto prameňov (Kullman, 2000; Malík, 2007). Mnoho autorov sa zaoberalo aj separáciou hydrogramu pomocou sledovania kvalitatívnych zmien a ich porovnávania s výdatnosťou za použitia chemického alebo izotopového zloženia vyvierajúcich krasových podzemných vôd (Hino, Hasebe, 1986; Hooper, Shoemaker, 1986; Dreiss, 1989; Lakey, Krothe, 1996; Talarovich, Krothe, 1998; Trček et al., 2006). Király (2003) podrobil kritike zamieňanie pojmov „stará voda", resp. „dávnejšie infiltrovaná zložka odtoku" so „základným odtokom". Pre ten istý tvar hydrogramu existuje podľa tohto autora veľké množstvo možností výsledného zloženia „dávnejšie infiltrovanej zložky" („starej vody"), pretože táto je daná riedením závisiacim od celkového vodou nasýteného objemu zvodnenca. Kvantitatívno–kvalitatívne vzťahy vo filtračne heterogénnom prostredí sú teda najviac ovplyvňované riedením a zmiešavaním vovnútri zvodnencov a stanovenie základných „koncových" zložiek tvoriacich výslednú vyvierajúcu zmes je bez detailného poznania fyzikálnych charakteristík zvodnenca veľmi komplikované, ak nie úplne nemožné. Podľa uvedeného autora tiež nie je možné odvodzovať hodnoty hydraulických parametrov zvodnencov z charakteristík výtokových čiar – výtokových parametrov (Király, 2003).

ZÁKLADNÝ PRINCÍP METÓDY SEPARÁCIE HYDROGRAMU POMOCOU PARAMETROV REPREZENTATÍVNEJ VÝTOKOVEJ ČIARY

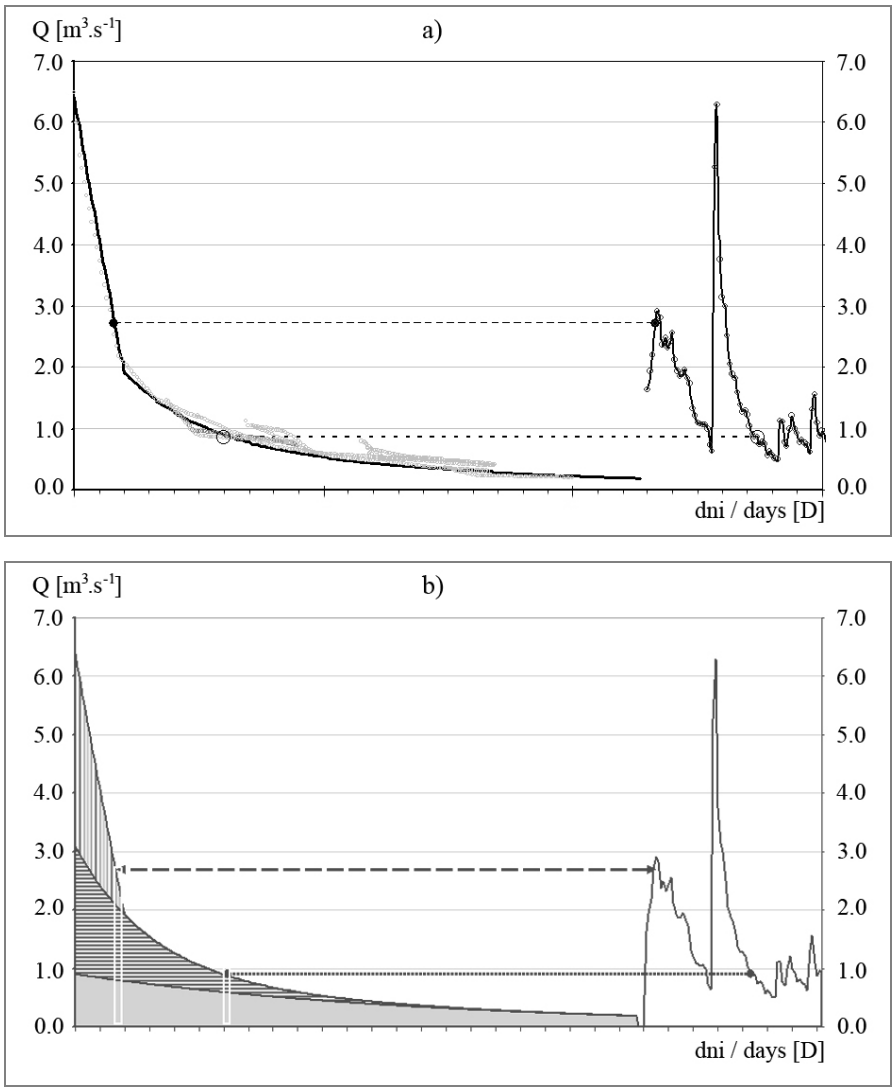
Základnou myšlienkou metódy separácie hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary je zjednodušenie ponímania hydraulických procesov vo zvodnenci (povodí, hydrologickom systéme) podľa princípu, že: „rovnaké odtekajúce množstvo odpovedá rovnakej hydrologickej situácii, rovnakému nasýteniu systému vodou, resp. rovnakej piezometrickej úrovni vo zvodnenci". V takomto ponímaní je hydrogram odrazom individuálnej všeobecne platnej reprezentatívnej výtokovej čiary systému (povodia, zvodnenca) pre každú situáciu. Separácia hydrogramu pomocou reprezentatívnej výtokovej čiary si preto vyžaduje detailné štúdium odtokových pomerov a zodpovedné zostavenie individuálnej reprezentatívnej výtokovej čiary, o ktorej predpokladáme, že odpovedajúco vyjadruje odtokové pomery.

Základný princíp metódy separácie hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary je názorne dokumentovaný na Obr. 1a, kde pre každý prietok v pravej časti obrázka nachádzame odpovedajúcu hodnotu na výtokovej čiare v ľavej časti obrázka (na obrázku sú spájané dve relevantné hodnoty prietokov 0,868 $m^3 \cdot s^{-1}$ a 2,706 $m^3 \cdot s^{-1}$ s hodnotami na výtokovej čiare). Obr. 1b následne ilustruje, ako môžu byť tieto hodnoty separované na jednotlivé subrežimy, keď menšia z nich pozostáva z dvoch a vyššia z troch subrežimov.

TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ METÓDY SEPARÁCIE HYDROGRAMU POMOCOU PARAMETROV REPREZENTATÍVNEJ VÝTOKOVEJ ČIARY

Uvádzaná metóda separácie hydrogramu je založená na predpoklade existencie individuálnej, reprezentatívnej výtokovej čiary charakterizujúcej odtok z hydrologického systému / povodia alebo prameňa. Vlastná separácia je vykonávaná na základe parametrov tejto reprezentatívnej výtokovej čiary jej iteratívnym riešením pre každú reálne nameranú výdatnosť alebo prietok. Z tohto dôvodu je potrebné krátko charakterizovať spôsob matematického opisu výtokových čiar, resp. nami aplikovanej reprezentatívnej výtokovej čiary. Hoci boli princípy analýzy hydrogramu vyvinuté už pred viac ako jedným storočím a táto metodika bola sústavne rozvíjaná (napr. Boussinesq, 1877, 1904; Maillet, 1905; Horton, 1933; Barnes, 1939; Cooper, Rorabaugh, 1963; Schoeller, 1965; Drogue, 1967; Kullman, 1980, 1990; Padilla et al., 1994; Griffiths, Clausen, 1997; Kovács, 2003; Gregor, 2008), až zavedenie výpočtovej techniky umožnilo jej rozvoj a využitie pre rozlišovanie napr. jednotlivých súčastí zmesných zložiek podzemných vôd (Goldscheider, Drew, 2007) podľa prítomnosti jednotlivých odtokových komponentov.

V rámci metódy separácie hydrogramu uvádzanej v tejto práci uvažujeme so základným jednoduchým exponenciálnym vyjadrením laminárnych subrežimov: $Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha \cdot t}$ – tak ako boli definované napr. v práci Forkasiewicz a Paloc (1967). $\boldsymbol{Q_t}$ tu predstavuje prietok v čase $\boldsymbol{t}$, $\boldsymbol{Q_0}$ počiatočný prietok a koeficient $\boldsymbol{\alpha}$ výtokový parameter, charakterizujúci laminárne subrežimy alebo podzemný a podpovrchový odtok. Pri časovom kroku 1 deň je rozmer koeficienta $\boldsymbol{\alpha}$ [1/deň], t.j. [D^{-1}].



Obr. 1: Princíp separácie hydrogramu pomocou reprezentatívnej výtokovej čiary
Fig. 1: Hydrograph separation based on master recession curve principles

Turbulentné subrežimy, resp. komponenty povrchového odtoku opisujeme základnou lineárnou rovnicou tvaru: $Q_t = Q_o \cdot (1-\beta \cdot t)$ – podľa Kullmana (1983), ktorý túto rovnicu aplikoval pre prejavy turbulentného prúdenia v krasových kanáloch, avšak analogicky opísateľné lineárne poklesávanie prietokov je pozorovateľné i v prejavoch povrchového odtoku. V rámci jedného (krasovo-puklinového) zvodnenca, resp. povodia sa môžu prejavovať účinky viacerých subrežimov odrazu, pričom celkový odtok v čase t je vyjadrený superpozíciou niekoľkých príslušných základných rovníc opisujúcich jednotlivé deje (Kullman, 1990). Superpozícia jednotlivých subrežimov je potom vyjadrená rovnicou (1). V tejto práci uvažujeme s jednotkou [deň] pre vyjadrenie veľkosti času t, v ktorom realizujeme výpočet jednotlivých zložiek odtoku (subrežimov). Vlastná separácia odtoku na jeho jednotlivé zložky spočíva najprv v hľadaní času t, ktorý teoreticky musel uplynúť od maximálnej výdatnosti / prietoku Q_0 reprezentatívnej výtokovej čiary po dosiahnutie príslušnej celkovej výdatnosti prameňa (odtoku z povodia) Q_t a ktorý je zároveň vyjadrený nasledovnou rovnicou (1):

$$Q_t = \sum_{1}^{m} Q_{0m} \cdot e^{-\alpha_k \cdot t} + \sum_{4}^{n} \left(\frac{1}{2} + \frac{|1-\beta_l \cdot t|}{2 \cdot (1-\beta_l \cdot t)} \right) \cdot Q_{0n} \cdot (1-\beta_l \cdot t) \quad (1)$$

kde m je zvyčajne ≤ 3; a podobne tiež n obvykle ≤ 6 (teda počet „turbulentných“ členov je obvykle ≤ 3) a podobne indexy k a l pre k-ty α_k a l-tý β_l koeficient sú podobne obvykle ≤ 3. Počet základných rovníc môže teda kolísať, v praktických úlohách sme sa však (analogicky s Kullmanom, 1990) nezaoberali vyšším počtom základných rovníc ani pre laminárne, ani pre turbulentné subrežimy. Teoreticky môže byť ich počet

neobmedzený, prítomnosť vyššieho počtu subrežimov/odtokových zložiek sa však pri analýze výtokových čiar identifikuje len s veľkými ťažkosťami. Pre doplnenie každého ***l***-tého člena základnej rovnice pre turbulentné zložky odtoku tvaru $Q_t = Q_o \cdot (1-\beta \cdot t)$ však ako doplnok k prácam Kullmana (1983, 1990, 2000 a ďalších), s ohľadom na výpočtové dopady negatívnych hodnôt členov rovnice v prípadoch $Q_o \cdot \beta \cdot t > Q_o$ nastávajúcich pre vyššie hodnoty času ***t*** zavádzame ***l***-tý člen A_l v rovnici (1) vyjadrený rovnicou (2) ako:

$$A_l = \left(\frac{1}{2} + \frac{|1-\beta_l \cdot t|}{2 \cdot (1-\beta_l \cdot t)}\right) \qquad (2)$$

Člen A_l je rovný 1 pre $\beta_l \cdot t < 1$ a rovný 0 pre $\beta_l \cdot t > 1$ a eliminuje tak vplyv potenciálne negatívnych hodnôt parciálnych komponentov turbulentných subrežimov. Počiatočné výdatnosti jednotlivých subrežimov Q_{0n} a Q_{0m} sú vopred určené analýzou hydrogramu, ktorá predchádza jeho separácii na jednotlivé odtokové zložky (subrežimy). Pred procesom separácie je však potrebné overiť, či sa súčet jednotlivých parciálnych počiatočných výdatností rovná (alebo je vyšší) ako maximálna výdatnosť / maximálny prietok v období, pre ktoré separáciu na jednotlivé zložky vykonávame. Teda pre vzťah počiatočných hodnôt jednotlivých subrežimov Q_{0n} a Q_{0m} a maximálnej hodnoty prietoku (výdatnosti) Q_{max} musí platiť:

$$Q_{\max} \le \left(\sum_{1}^{m} Q_{0m} + \sum_{4}^{n} Q_{0n} \right) \qquad (3)$$

Analyzované úseky výtokových čiar totiž nemusia zahŕňať aj poklesové obdobia od bodu najvyššej výdatnosti v danom období, najčastejšie z dôvodu tvaru analyzovaných úsekov hydrogramov (viacnásobné lokálne maximá v oblasti globálneho maxima). V prípade, že po zistení parametrov výtokovej čiary analýzou hydrogramu podmienka (3) neplatí, je potrebné stanoviť veľkosť parciálnych počiatočných výdatností Q_{0n} a Q_{0m} ešte pred začiatkom separácie pomocou rovnice (1). Splnenie podmienky (3) dosiahneme postupným dosadzovaním záporných hodnôt času ***t*** pričom zisťujeme veľkosť hodnoty Q_t. V prípade, že $Q_t \ge Q_{max}$, aplikujeme rovnakú hodnotu príslušného času ***t*** (t_{max}) v rámci jednotlivých parciálnych rovníc, pričom však koeficienty α_k a β_l ostávajú nezmenené, konštantné. Je potrebné zopakovať, že hodnoty Q_{0n}; Q_{0m}; α_k a β_l ostávajú počas celého procesu separácie rovnaké, t.j. každá separácia je vztiahnutá k jednoznačne definovanému súboru týchto hodnôt.

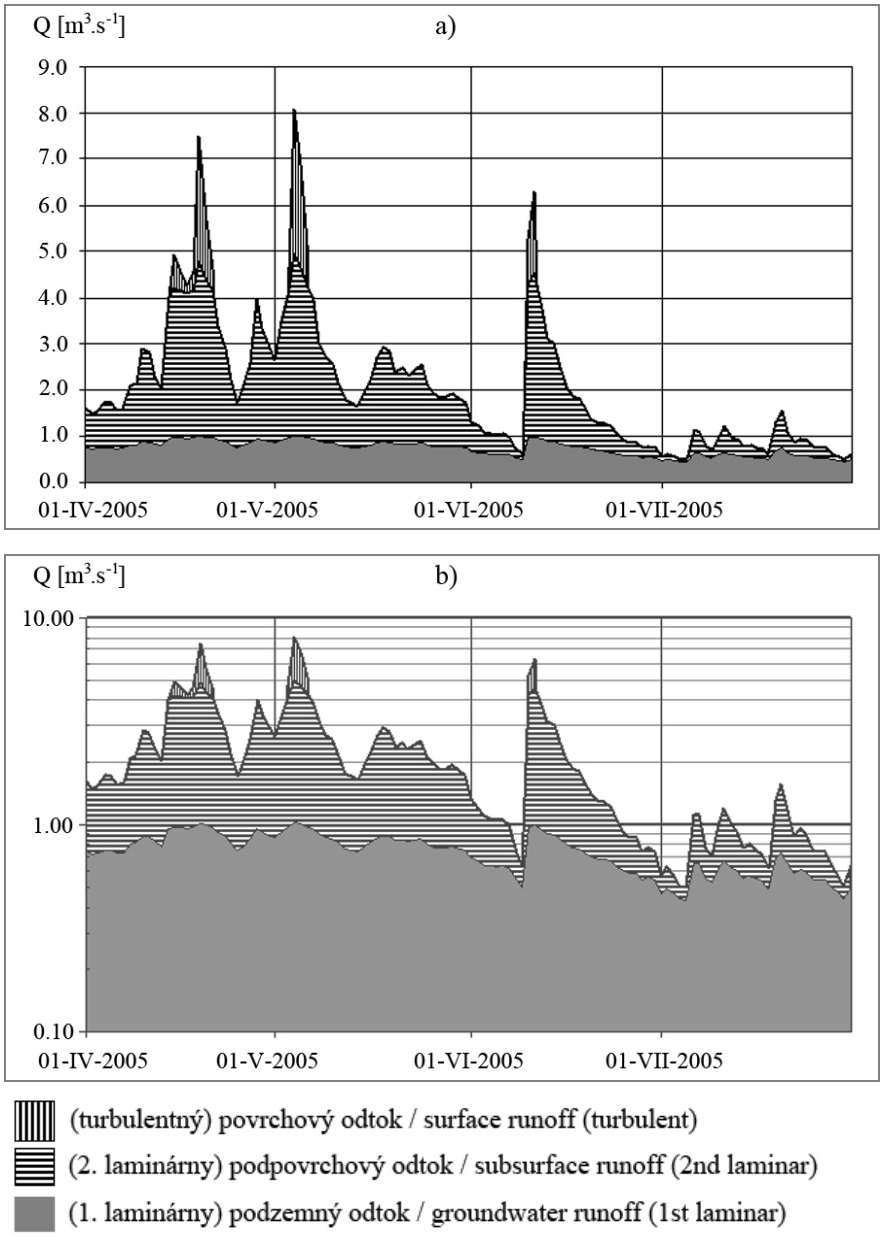
Praktickým dôsledkom základného princípu metódy je, že každá nameraná hodnota výdatnosti Q_t môže byť rozdelená na parciálne výdatnosti odpovedajúce jednotlivým subrežimom, z ktorých niektoré (laminárne i turbulentné) však môžu byť nulové. Každá nameraná hodnota výdatnosti Q_t je v zmysle rovnice (1), pri zachovaní konštantnosti hodnôt Q_{0n}; Q_{0m}; α_k a β_l potom determinovaná iba reprezentatívnym časom t_r, t.j. časom, ktorý teoreticky uplynul od celkovej maximálnej výdatnosti Q_{max}. Následne môžu byť množstvá odtekajúce v jednotlivých subrežimoch (***k***-tom laminárnom či ***l***-tom turbulentnom) alebo zložkách odtoku: základnom, podpovrchovom, povrchovom) vypočítané dosadením reprezentatívneho času t_r pre príslušnú výdatnosť Q_t do jednotlivých parciálnych základných rovníc (***m***-tej exponenciálnej alebo ***n***-tej lineárnej).

PRAKTICKÉ RIEŠENIA SEPARÁCIE HYDROGRAMU

Po tom, ako boli všetky subrežimy výdatnosti prameňa alebo zložky odtoku explicitne definované vyššie uvedenými rovnicami, a ich parametre Q_{0n}; Q_{0m}; α_k a β_l boli fixne stanovené aspoň pre konkrétny daný proces separácie, môže byť aplikovaná reverzná metóda stanovenia prítomnosti jednotlivých zložiek v každej nameranej výdatnosti Q_t. V prvom rade ide o stanovenie reprezentatívneho času t_r, ktorý teoreticky uplynul od absolútnej maximálnej výdatnosti Q_{max}. Ako už bolo vyššie uvedené, môže sa jednať o celkovú reálne zistenú maximálnu výdatnosť, alebo o teoretické (dostatočné) maximum dané súčtom parciálnych počiatočných výdatností Q_{0n} a Q_{0m}. Každá nameraná výdatnosť Q_t musí byť zároveň i súčtom jednotlivých parciálnych výdatností subrežimov. Reprezentatívny čas t_r, ktorý teoreticky uplynul od absolútnej maximálnej výdatnosti Q_{max} je rovnaký pre všetky zložky odtoku a ak poznáme riešenie pre veľkosť reprezentatívneho času t_r, odpovedajúceho výdatnosti Q_t, môžeme následne ľahko vypočítať parciálne výdatnosti Q_{tm} alebo Q_{tn}, ktoré vyjadrujú zastúpenie jednotlivých zložiek odtoku v danej výdatnosti Q_t. Tento výpočet môžeme realizovať pre jednu hodnotu výdatnosti, ako aj pre výdatnosti namerané v každom momente sledovaného obdobia.

Nakoľko exponenciálna rovnica nemá analytické riešenie, a v danom prípade musíme realizovať riešenie spojené s hľadaním reprezentatívneho času t_r súčasne pre všetky ***m***-té exponenciálne a ***n***-té lineárne základné parciálne rovnice, je potrebné realizovať iteratívne riešenie rovnice (1) pre každú hodnotu výdatnosti Q_t. V iteratívnom procese porovnávame navzájom dve riešenia s extrémnymi počiatočnými hodnotami reprezentatívneho času t_r, ktoré sa postupne modifikujú s konvergenciou k výsledku v požadovanej presnosti. Začíname paralelne riešiť dve rovnice (1), do ktorých postupne dosadzujeme rozdielne hodnoty reprezentatívneho času t_r, pričom navzájom porovnávame výsledky. Ako extrémne počiatočné hodnoty riešenia zvykneme v prvom iteračnom kroku zadávať hodnoty

$t_r = 0$ a $t_r = 1/\alpha_1$ (o koeficiente α_1 totiž predpokladáme, že jeho hodnota je najmenšia zo všetkých hodnôt koeficientov α_k a β_l a preto by hodnota $1/\alpha_1$ mohla byť dostatočne veľkou). V priebehu jednotlivých krokov riešenia neustále porovnávame nameranú hodnotu výdatnosti Q_t a vypočítanú hodnotu výdatnosti Q_{vyp} prvej i druhej vetvy riešenia, a podľa ich vzťahu ($Q_t > Q_{vyp}$ alebo $Q_t < Q_{vyp}$) zmenšujeme alebo zväčšujeme hodnotu t_r o polovičnú hodnotu z predchádzajúceho kroku riešenia. V prípade, že obe vetvy riešenia k sebe konvergujú a rozdiel medzi nimi je menší než je požadovaná presnosť riešenia, je možné výpočet zastaviť. Počet krokov iteratívneho riešenia teda závisí od požadovanej presnosti riešenia, ktorú však musíme uviesť do súladu s reálnou presnosťou meraní výdatnosti alebo prietokov. V súčasnosti sa pri praktických výsledkoch monitorovacích meraní zvyčajne jedná o relatívnu presnosť ± 5,0 %, v prípade meraní výdatnosti na prameňoch teda väčšinou nie vyššiu ako 0,005 $l \cdot s^{-1}$ a v prípade meraní prietokov na povrchových tokoch väčšinou nie vyššiu ako ± 0,001 $m^3 \cdot s^{-1}$.



Obr. 2: Separácia hydrogramu z vodomernej stanice 5600 Jalovecký potok / Jalovčianka v Liptovskej Ondrašovej pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary

Fig. 2: Hydrograph separation based on master recession curve parameters, example of gauging station #5600 Jalovecký potok / Jalovčianka in Liptovská Ondrašová

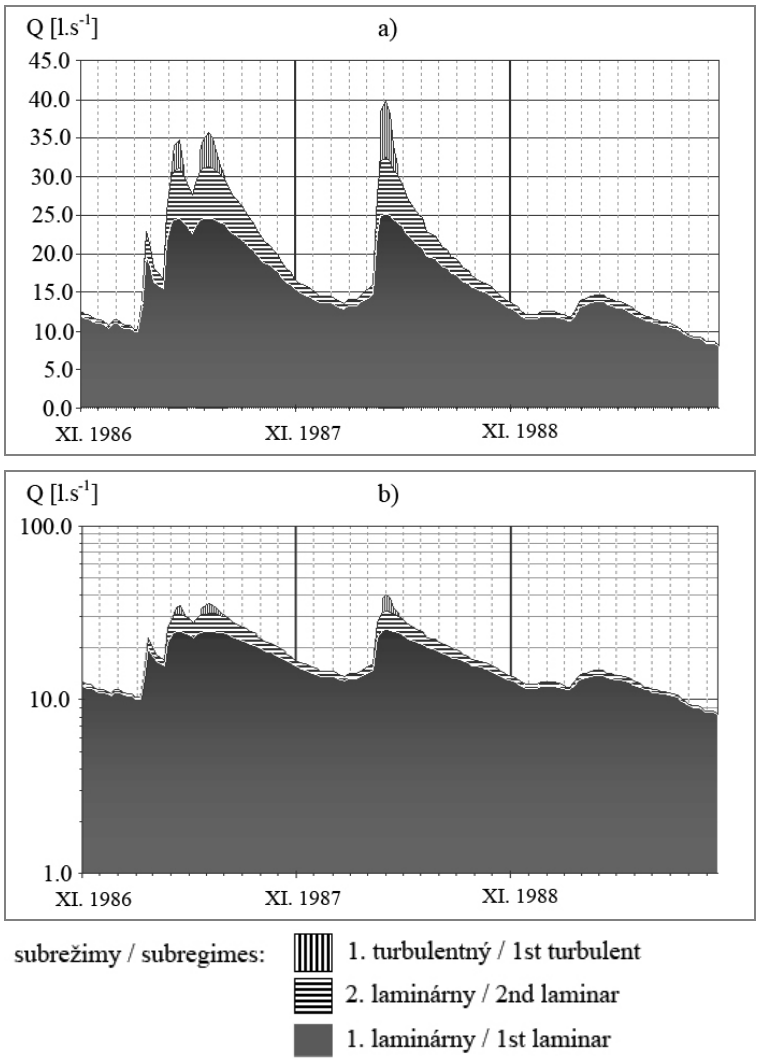
Pre získanie výsledku s takouto presnosťou zvyčajne postačuje počet 10 krokov iteratívnych procedúr. Aby sme sa uistili o správnosti získaného výsledku, je vhodné na konci každého riešenia kontrolovať rozdiel vypočítaných a nameraných hodnôt.

APLIKÁCIE METÓDY SEPARÁCIE HYDROGRAMU POMOCOU PARAMETROV REPREZENTATÍVNEJ VÝTOKOVEJ ČIARY NA PRAKTICKÝCH PRÍKLADOCH

Ako bolo prezentované v predchádzajúcom texte, separáciu odtoku/výdatnosti na ich jednotlivé zložky môžeme aplikovať jednak na povodia (hydrologické systémy) a jednak na odtok podzemných vôd z prameňov. Pri riešení praktických úloh pre povrchové toky môže byť problémom priradenie jednotlivých zložiek odtoku klasicky ponímaným komponentom (základný odtok / podzemný odtok; podpovrchový / hypodermický odtok; povrchový odtok). Ako príklad uvádzame separáciu hydrogramu Jaloveckého potoka – Jalovčianky v Liptovskej Ondrašovej (katalógové číslo SHMÚ 5600; Obr. 2). K dispozícii boli priemerné denné prietoky z obdobia 1991 – 2008, dané dáta sa ukázali postačujúce na zostavenie reprezentatívnej výtokovej čiary v tvare (4):

$$\boldsymbol{Q_t} = 1{,}11 \cdot e^{-0{,}007 \cdot t} + 5{,}92 \cdot e^{-0{,}033 \cdot t} + 8{,}25 \cdot (1 - 0{,}05 \cdot t) \qquad (4)$$

Z rovnice (4) vyplývajú nasledovné vstupné hodnoty jednotlivých parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary povodia Jalovčianky v Ondrašovej: $\boldsymbol{Q_{01}}$ = 1,11 $m^3 \cdot s^{-1}$; $\boldsymbol{\alpha_1}$ = 0,007 D^{-1}; $\boldsymbol{Q_{02}}$ = 5,92 $m^3 \cdot s^{-1}$; $\boldsymbol{\alpha_2}$ = 0,033 D^{-1}; $\boldsymbol{Q_{03}}$ = 0; $\boldsymbol{\alpha_3}$ = 0; $\boldsymbol{Q_{04}}$ = 8,25 $m^3 \cdot s^{-1}$; $\boldsymbol{\beta_1}$ = 0,05 D^{-1};



Obr. 3: Separácia hydrogramu prameňa 231 Vítek v Chtelnici pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary – a) výdatnosti v normálnej mierke; b) výdatnosti v logartimickej mierke

Fig. 3: Hydrograph separation based on master recession curve parameters, example of spring 231 Vítek in Chtelnica – a) discharges in normal scale; b) discharges in logarithmical scale

$Q_{05} = 0$; $\beta_2 = 0$; $Q_{06} = 0$; $\beta_3 = 0$. Z hľadiska priradenia laminárnych, resp. turbulentných subrežimov k jednotlivých zložkám odtoku v súčasnosti predpokladáme, že základný odtok, ponímaný ako odtok podzemných vôd z hlbšie založených obehových systémov je charakterizovaný jedným až dvoma laminárnymi subrežimami. Ukazuje sa to napríklad pri analýze hydrogramu z vodomernej stanice 5550 (Váh v Liptovskom Mikuláši), kde sa v priebehu relatívne nízkych výdatností stále prejavuje vysoké zastúpenie druhého laminárneho subrežimu. Zložka prvého laminárneho subrežimu, ktorá bola analyzovaná z výtokovej čiary pre dlhé obdobie sucha s veľmi nízkym výtokovým koeficientom α, je v celkovej výdatnosti neustále prítomná, avšak jej zastúpenie je pri „normálnych“ nízkych stavoch stále prekryté aj druhou laminárnou zložkou. Prvý laminárny subrežim sa podľa analýzy reprezentatívnej výtokovej čiary naplno prejaví len pri extrémnych suchách. Podpovrchový (hypodermický) odtok je charakterizovaný laminárnym subrežimom s vyššími hodnotami výtokového koeficienta α a povrchový odtok je determinovaný subrežimami s turbulentným prúdením. Iba dostatočné množstvo analyzovaných odtokov z povodí rôznej geologickej stavby a morfologických parametrov v budúcnosti môže v tomto ohľade poskytnúť spresňujúce informácie.

V prípade podzemných vôd (výdatností prameňov) bola separácie hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary aplikovaná na niekoľkých prameňoch v Brezovských Karpatoch. Vzhľadom na prevažne dolomitický charakter prostredia (Malík et al., 1992) bola však vo viacerých prípadoch analýzou výtokových čiar zistená iba prítomnosť jedného (základného laminárneho) subrežimu, kde sú potom aplikácie separácie zbytočné. Zaujímavé boli výsledky zistené napr. pre prameň Vítek (katalógové číslo SHMÚ 231) nad obcou Chtelnica. K dispozícii boli (ako pre väčšinu v minulosti pozorovaných prameňov) iba týždenné výdatnosti, zisťované pozorovateľmi každú stredu v teréne. I tieto údaje sa ukázali ako postačujúce pre zostavenie reprezentatívnej výtokovej čiary v tvare (5).

$$Q_t = 25{,}68 \cdot e^{-0{,}003 \cdot t} + 7{,}66 \cdot e^{-0{,}010 \cdot t} + 9{,}52 \cdot (1 - 0{,}04 \cdot t) \quad (5)$$

Z rovnice (5) vyplývajú tieto vstupné hodnoty jednotlivých parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary prameňa 231 Vítek nad obcou Chtelnica: Q_{01} = 25,68 l·s^{-1}; α_1 = 0,003 D^{-1}; Q_{02} = 7,66 l·s^{-1}; α_2 = 0,010 D^{-1}; $Q_{03} = 0$; $\alpha_3 = 0$; Q_{04} = 9,52 l·s^{-1}; β_1 = 0,04 D^{-1}; Q_{05} = 0; $\beta_2 = 0$; $Q_{06} = 0$; $\beta_3 = 0$. Z hľadiska zostavenia reprezentatívnej výtokovej čiary prameňa Vítek sa i podklady týždenných výdatností ukázali ako dostatočné. V iných prípadoch (napr. prameň 251 Spod javora / Šteruská v obci Prašník – Pustá Ves) však bolo podľa týchto podkladov možné zostrojiť reprezentatívnu výtokovú čiaru len s ťažkosťami. Aj kontrolné pozorovania v teréne však ukázali slabú hodnovernosť údajov, uvádzaných miestnym pozorovateľom, a tak v prípade manuálnych pozorovaní výdatností závisí použiteľnosť metódy najmä od ľudského faktora, spätne už neovplyvniteľného.

ZÁVER

Základnou myšlienkou metódy separácie hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary je princíp, podľa ktorého rovnaké odtekajúce množstvo odpovedá rovnakej hydrologickej situácii, rovnakému nasýteniu systému vodou, resp. rovnakej piezometrickej úrovni vo zvodnenci. Rovnaká úroveň piezometrických výšok sa teoreticky odráža v rovnakých hodnotách odtoku a rovnaký odtok odpovedá vždy tej istej úrovni piezometrických výšok. Ide tu o značné zjednodušenie ponímania hydraulických procesov vo zvodnenci (povodí, hydrologickom systéme). Na druhej strane však tento predpoklad umožňuje praktické narábanie s reprezentatívnou výtokovou čiarou, podľa ktorej je každá hodnota reálne zmeraného odtoku považovaná za výsledok superpozície jeho jednotlivých zložiek (laminárne subrežimy – zložky vyjadrené exponenciálnymi rovnicami; turbulentné subrežimy – zložky vyjadrené lineárnymi rovnicami). Každý hydrologický systém (zvodnenec, povodie) môže byť opísaný individuálnymi, konštantnými hodnotami počiatočných výdatností Q_{0n} a Q_{0m} a konštantnými hodnotami výtokových parametrov α_k a β_l pre každý zo zistených subrežimov. Každá nameraná hodnota výdatnosti Q_t je potom v riešení rovnice výtokovej čiary determinovaná iba reprezentatívnym časom t_r, t.j. časom, ktorý teoreticky uplynul od prijatej hodnoty celkovej maximálnej výdatnosti Q_{max}. Následne môžu byť množstvá odtekajúce v jednotlivých subrežimoch / zložkách (Q_{tm} alebo Q_{tn}) odtoku vypočítané dosadením reprezentatívneho času t_r pre príslušnú výdatnosť Q_t do jednotlivých parciálnych základných rovníc pre každú jednotlivú hodnotu nameranej výdatnosti Q_t. Proporcionálne množstvá odtekajúce v jednotlivých subrežimoch pre každý daný moment môžu byť použité jednak na kvantitatívne hodnotenie jednotlivých zložiek odtoku (vyčlenenie základného odtoku) a jednak na hodnotenie kvantitatívne–kvalitatívnych vzťahov (napr. porovnanie zastúpenia jednotlivých zložiek odtoku/výdatnosti a obsahu kvalitatívnych komponentov s výpočtom koncových členov výslednej zmesi).

Vlastné riešenie separácie hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary si v prvom rade vyžaduje zodpovednú analýzu hydrogramu a zostavenie individuálnej reprezentatívnej výtokovej čiary. Reprezentatívna výtoková čiara by mala odpovedajúco vyjadrovať odtokové pomery. V našom ponímaní je daná superpozíciou jednej až troch základných exponenciálnych rovníc opisujúcich laminárne prúdenie

v systéme ($Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha \cdot t}$), pričom prvý v poradí má najnižšie hodnoty koeficienta α a ich veľkosť sa postupne zvyšuje, a žiadnej až troch lineárnych rovníc opisujúcich turbulentné prúdenie ($Q_t = Q_o \cdot (1-\beta \cdot t)$; pre veľkosť koeficientov β platí analógia s laminárnym prúdením). Jej riešenie pre každú nameranú hodnotu výdatnosti Q_t je vlastne iteratívnym hľadaním reprezentatívneho času t_r (exponenciálne rovnice nemajú analytické riešenie). Počet iterácií závisí od požadovanej presnosti riešenia, ktorá by ale mala byť v súlade s reálnou presnosťou meraní výdatnosti alebo prietokov (v súčasnosti relatívna presnosť ± 5,0 %), zvyčajne postačuje iteračných 10 krokov. Výsledkom riešenia alebo súboru riešení je potom jedna hodnota alebo súbor hodnôt reprezentatívneho času t_r, podľa ktorých sa vykonáva vlastná separácia hydrogramu – rozdelenie jednej hodnoty výdatnosti na príslušné zložky odtoku, alebo vyčlenenie týchto zložiek (subrežimov) pre všetky prietoky a výdatnosti požadovanom hodnotenom období.

Pri riešení praktických úloh pre povrchové toky môže byť problémom priradenie jednotlivých zložiek odtoku klasicky ponímaným komponentom (základný odtok / podzemný odtok; podpovrchový / hypodermický odtok; povrchový odtok). V súčasnosti predpokladáme, že základný odtok, ponímaný ako odtok podzemných vôd z hlbšie založených obehových systémov je charakterizovaný jedným až dvoma laminárnymi subrežimami. Podpovrchový (hypodermický) odtok je charakterizovaný laminárnym subrežimom s vyššími hodnotami parametra vytekania α a povrchový odtok je determinovaný subrežimami s turbulentným prúdením. Iba dostatočné množstvo analyzovaných odtokov z povodí rôznej geologickej stavby a morfologických parametrov v budúcnosti môže v tomto ohľade poskytnúť spresňujúce informácie. V prípade podzemných vôd, resp. výdatností prameňov bola metóda rozboru výtokových čiar už niekoľko dekád uplatňovaná, avšak separácia celkovej výdatnosti na jednotlivé zložky iteratívnym riešením reprezentatívnej výtokovej čiary môže i teraz poskytnúť nový priestor pre analýzu kvantitatívne–kvalitatívnych vzťahov.

Metóda separácie hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary je založená na zjednodušenom predpoklade, že rovnaký prietok (výdatnosť) odpovedá rovnakému stavu nasýtenia hydrologického systému vodou (rovnakej piezometrickej úrovni vo zvodnenci). V skutočnosti však v každom zvodnenci / hydrologickom systéme existuje niekoľko úrovní piezometrických výšok, prinajmenšom aspoň jedna pre každý obehový podsystém (mikropukliny – makropukliny – krasové kanály v krasovo-puklinových zvodnencoch / hlbšie založené obehové systémy – pripovrchová zóna – povrchový odtok v povodiach), ak už nie pre ich samostatné časti v priestorovom zastúpení. Zmeny týchto parciálnych piezometrických výšok v čase sa od seba navzájom významne odlišujú. Király (2003) vníma koeficienty vytekania ako globálne parametre závisiace od globálnej konfigurácie krasového zvodnenca, od jeho foriem i priestorového rozšírenia, a neodporúča ich aplikovať pre výpočet hydraulických parametrov týchto zvodnencov. Ten istý autor zdôrazňuje úlohu procesov zmiešavania vnútri zvodne a pomocou simulovaných riešení dokazuje, že nevodne aplikovaná separácia hydrogramu podľa izotopového alebo chemického zloženia odtekajúcich vôd môže viesť k nesprávnym hodnoteniam hydrodynamických procesov vo zvodnenci. V praxi sa však najčastejšie stretáme s prípadmi, keď odtok z povodia alebo výdatnosť prameňa predstavuje jedinú kvantitatívnu referenciu celého systému. Zjednodušená separácia hydrogramu pomocou parametrov reprezentatívnej výtokovej čiary, založená na individuálnych fixných hodnotách parametrov parciálnych počiatočných výdatností a výtokových parametrov stanovených pomocou starostlivo analyzovaných hydrogramov môže reprezentovať cenný nástroj pre kvantitatívne vyjadrenie jednotlivých základných zložiek odtoku. Prezentovaná metóda však môže predstavovať perspektívu aj pre kvantitatívne referencovanie analyzovaných kvalitatívnych parametrov pre ďalšie kvantitatívne–kvalitatívne interpretácie, ako aj pre stanovenie hraničných hodnôt (výdatností) začiatku alebo konca trvania jednotlivých subrežimov / zložiek odtoku. Bez predchádzajúcej dôslednej analýzy hydrogramov však môžeme ľahko dospieť k chybným uzáverom.

LITERATÚRA

APPLEBY, F.V. 1970: Recession and the baseflow problem. *Wat. Resour. Res.* (Washington), 6, 5, s. 1398-1403.

BALEK, J. 1989: Groundwater resources assessment. Developments in water science, 38, Elsevier, Amsterdam. 245 s.

BARNES, B. S. 1939: The structure of Discharge-Recession Curves. Trans. Amer. Geophys. Un. Part IV. s. 721-725.

BATES, B. C., DAVIES, P. K. 1988: Effect of baseflow separation procedures on surface runoff models. *Journal of Hydrology*, 103, s. 309-322.

BOUSSINESQ, M. J. 1877: Essai sur la theories des eax courantes. Memoires presentes par divers savants a l'Academie des Sciences de l'Institut National de France, Tome XXIII, No. 1.

BOUSSINESQ, M. J. 1904: Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le debit des sources. *Journal de mathématiques*, 5^{e}, serie, 10.

BROWNE, T. J. 1978: An analysis of low streamflow recession curves in Devon. *Rep. Trans. Devon. Assoc. Adv. Sci.*, 110, s. 81-94.

CASTANY, G., MARGAT, J., ALBINET, M., DELLAROZIÈRE-BOUILLIN, O. 1970: Evaluation rapide de ressources en eaux d´une région. In: *Atti – Convegno Internaz. sulle acque sotteranee*, 6-8 dicembre 1970, AIH – ESA, Palermo, s. 462-482.

COOPER, H. H. jr. a RORABAUGH, M. I. 1963: Groundwater movements and bank storage due to flood stages in surface streams. *USGS Water Supply Paper*, 1536-J, s. 343-366.

DREISS, S. J. 1989: Regional scale transport in a karst aquifer, 1. Component separation of spring flow hydrographs. *Water Resources Research*, 25, 1, s. 117.125.

DROGUE, C. 1967: *Essai de détermination des composantes de l'écoulemet des sources karstiques. Evaluation de la capacité de rétention par chenaux et fissures*. Chronique d'Hydrogéologie, 10, Bureau de Recherches Geologiques et Miniéres, Paris.

DROGUE, C. 1972: Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. *Journal of Hydrology*, 15, s. 49-68.

FENDEKOVÁ, M., FENDEK, M. 1999: Killeho metóda – teória a prax. *Podzemná voda*, 5, č. 2, s. 77-87.

FORKASIEWICZ, J., PALOC, H. 1967: Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. *Chronique d'hydrogéologie*, 10, s. 59-73.

FOSTER, E. E. 1948: Rainfall and runoff. MacMillan, New York.

GEDEON, M. 1999: Vyčlenenie podzemného odtoku modifikovanou Fosterovou metódou. *Podzemná voda*, 5, č. 2, s. 88-93.

GOLDSCHEIDER, N., DREW, D. (eds.) 2007: *Methods in Karst Hydrogeology*. International contributions to hydrogeology, 26, International Association of Hydrogeologists, London, Taylor & Francis 2007, 264 s.

GREGOR, M. 2008: Vývoj programov na analýzu časových radov výdatností prameňov a prietokov vodných tokov. *Podzemná voda*, 14, č. 2, s. 191-200.

GRIFFITHS, G. A., CLAUSEN, B. 1997: Streamflow recession in basins with multiple water storages. *Journal of Hydrology*, 190, s. 60-74.

HANZEL, V., FRANKO, O., JETEL, J. (Eds.), BODIŠ, D., BÖHM, V., BUJALKA, P., FIDES, J., FRANKO, O., HANZEL, V., HYÁNKOVÁ, K., JETEL, J. 1998. Geologický slovník. Hydrogeológia. Bratislava, Vydavateľstvo Dionýza Štúra 1998. s. 301.

HINO, M., HASEBE, M. 1986: Separation of a storm hydrograph into runoff components by both filter-separation Ar method and environmental isotope tracers. *Journal of Hydrology*, 15, s. 251-264.

HORTON, R. E. 1933: The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14, s. 446-460.

HOOPER, R. P., SHOEMAKER, C. A. 1986: A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, 22, č. 10, s. 1444-1454.

CHAPMAN, T. 1999: A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrol. Processes*, 13, s. 701-714.

INESON, J., DOWNING, R. A. 1964: The ground-water component of river discharge and its relationship in hydrogeology. *J. Inst. Wat. Engrs* (London), 18, s. 519–541

JAMES, L. D., THOMPSON, W. O. 1970: Least squares estimation of constants in a linear recession model. *Water Resources Research*, 6, č. 4, s. 1062-1069.

KESSL, J., KNĚŽEK, M. 2000: Metody výpočtu základního odtoku. *Podzemná voda*, 6, č. 2, s. 52-58.

KILLE, K. 1970: Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Z. Dtsch. geol. Gesell. (Hannover), *Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem.*, s. 89-95.

KIRÁLY, L. 2003: Karstification and Groundwater Flow / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers. In: Gabrovšek, F. (Ed.). 2002: *Evolution of karst: from prekarst to cessation*, Zalozba ZRC, Postojna-Ljubljana, s. 155-190.

KLINER, K., KNĚŽEK, M. 1974: Metoda separace podzemního odtoku při využití pozorování hladiny podzemních vod. *Vodohospod. Čas. Slov. Akad. Vied* (Bratislava), 22, 5.

KNĚŽEK, M. 1988: *Podzemní složka odtoku*. Práce a Studie, Seš. 171. Výzk. Úst. vodohospod. Stát. zeměděl. nakl., Praha, 61 s.

KOVÁCS, A. 2003: Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers – a hydrodynamic modelling approach. PhD. thesis, La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel, Suisse, 131 s.

KRESIC, N. A. 1993: Review and selected bibliography on quantitative definition of karst hydrogeological systems. Annotated bibliography of Karst Terranes. International Contributions to Hydrogeology, 14, s. 51-87.

KULANDAISWAMY, V. C. a SEETHARAMAN, S. 1969: a note on Barnes' method of hydrograph separation. *Journal of Hydrology*, 9, s. 222-229.

KULLMAN, E. 1980: L'evaluation du regime des eaux souterraines dans les roches carbonatiques du Mésozoique des Carpates Occidentales par les courbes de tarissement des sources. *Západné Karpaty, sér. hydrogeológia a inžinierska geológia,* 3, Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, s. 7-60.

KULLMAN, E. 1983: Režim podzemných vôd s turbulentným prúdením v puklinovo–krasovom horninovom prostredí. *Geologické práce*, 79, Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, s. 237-262.

KULLMAN, E. 1990: *Krasovo–puklinové vody. Karst-fissure waters.* Bratislava, Geologický ústav Dionýza Štúra 1990. s. 184.

KULLMAN, E. 2000: Nové metodické prístupy k riešeniu ochrany a ochranných pásiem zdrojov podzemných vôd v horninových prostrediach s krasovo-puklinovou priepustnosťou. *Podzemná voda*, 6, č. 2, s. 31-41.

KULLMAN, E., PETRÁŠ, I. 1977: Čiary vyčerpávania prameňov a ich využitie pre hydrogeologickú charakteristiku horninového prostredia. *Geologické práce, Správy* 67, Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, s. 211-238.

KULLMAN, E., PETRÁŠ, I. 1979: *Výtokové pomery prameňov a ich vzťah k horninovému prostrediu*. Zborník prác HMÚ. Zv. 13. Alfa Bratislava 1979, 308 s.

LAKEY, B. a KROTHE, N. C. 1996: Stable Isotopic Variation of Storm Discharge from a Perennial Karst Spring, Indiana. *Water Resources Research*, 32, 3, s. 721–731

LAMB, R. a KEITH, B. 1997: Using interactive recession curve analyses to specify a general catchment storage model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1 (1997), s. 101–113

LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A., Paulhus, J. L. H. 1982: *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, New York 1982. Hydrograph analysis.

MAILLET, E. 1905: *Essais d'Hydraulique Souteeraine et Fluviale*. Paris, Hermann Paris 1905. s. 218.

MALÍK, P., KULLMAN, E., VRANA, K. 1992: Hydrogeológia karbonátov mezozoika Brezovských Karpát. *Západné Karpaty, séria hydrogeológia a inžinierska geológia, 10*, Geologický ústav Dionýza Štúra Bratislava, s. 53-98.

MALÍK, P. 2007: Assessment of regional karstification degree and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analysis in the Velka Fatra Mts., Slovakia. Water Resources and Environmental Problems in Karst. *Environmental Geology*, 51, s. 707-711.

NATHAN, R. J., McMAHON, T. A. 1990: Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. *Water Resources Research,* 26, 7, s. 1465-1473.

PADILLA, A., PULIDO BOSCH, A., MANGIN, A. 1994: Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring. *Ground Water*, 32, s. 267-277.

PETTYJOHN, W. A. a HENNING, R. 1979: Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. Ohio State University Water Resources Centre Project Completion Report No 552, Ohio, 323 s.

PEREIRA, L. S. 1977: Etudes de tarissement sur des petits basins versants de montagne. Rapport 12/77 de 1'Institut d'Hydromécanique et d'Aménagement des Eaux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich.

PEREIRA, L. S., KELLER, H. M. 1982: Factors affecting recession parameters and flow components in eleven small Pre-Alp basins. *IAHS Publ. 138*, s. 233-242.

PM Consulting Engineers (KULLMAN, E., KISSANE, S., ŠALAGA, I.) 1997: Evaluation of groundwater resources in Slovakia. Final Report, Volume 1, PHARE Project Number EU/95/WAT/31. Manuskript – Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava, 456 s.

POSAVEC, K., BAČANI, A., NAKIĆ, Z. 2006: A visual basic spreadsheet macro for recession curve analysis. *Ground Water*, 44, 5, s. 764-767.

RAMBERT, R. 1971: Aplication de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau á l'évaluation de l'écoulement souterrain. Bureau de Recherches Géologiques et Miniéres, Orléans, France, 34 s.

RUTLEDGE, A. T. 1998: Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground-Water Recharge and Discharge from Streamflow Records-Update. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4148, Reston, Virginia, 43 s.

SCHOELLER, H. 1965: Hydrodynamique dans le Karst. Hydrogeologie des roches fissurées, Actes du colloque de Dubrovnik 1965, IAHS-UNESCO.

SLOTO, R. A., CROUSE, M. Y. 1996: HYSEP: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040, Reston, Virginia, 46 s.

TALAROVICH, S. G, KROTHE, N. C. 1998: Three-Component Storm Hydrograph Separation of a Karst Spring Contaminated by Polychlorinated Biphenyls in Central Indiana. *Environmental Geosciences*, 5, 4, s. 162-176.

TALLAKSEN, L. M. 1995: Review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165, s. 349-370.

TRČEK, B., VESELIČ, M., PEZDIČ, J. 2006: The vulnerability of karst springs – a case study of the Hubelj spring (SW Slovenia). *Environmental Geology*, 49, s. 865-874.

WARD, R. C. 1967: Principles of Hydrology. McGraw-Hill, London, 403 s.

WUNDT, W. 1953: Die Niedrigwasserführung in Baden-Würtemberg als Maß für verfügbaren Grundwassermengen. *Gas- u. Wasserfach (München)*, 24, s. 719-722.

WUNDT, W. 1958: Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: R. GRAHMANN: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. Forsch. Dtsch. Landeskunde (Remagen), 104, s. 47-54.

WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M. 1999: Watershed groundwater balance estimation using stream-flow recession analysis and baseflow separation. *Journal of Hydrology*, 219, s. 20-33.

YEVJEVICH, V. (ed.) 1976: Karst hydrology and water resources. In: *Proceeding of the U.S.Yugoslavian Symp.*, Dubrovnik 1975, Water Resources Pub., 1-2, Fort Collins, U.S., 873 s.

SUMMARY

A hydrograph separation technique, using the iterative solution of several exponential and linear equation members, was developed. The method uses parameters from a set of simple exponential equations (starting discharges $\boldsymbol{Q_0}$ and recession coefficients $\boldsymbol{\alpha}$ in general) and linear equations (starting discharges $\boldsymbol{Q_0}$ and recession coefficients $\boldsymbol{\beta}$ in general). The main idea behind the method is based on a simplified understanding of a hydrologic system reality: the same discharge should reflect the same water saturation (piezometric) level in the system. Principles of hydrograph separation based on master recession are demonstrated on Figs. 1a and 1b, where for every discharge on the right side of each figure, relevant value on recession curve is found (by calculation, as described later). Fig. 1 shows, how each discharge value can be divided into several subregimes, depending on its position on master recession curve. Hence, the separation method requires detailed recession curve studies of each hydrologic/aquifer system to create really

representative master recession curve mathematically described by the same parameters. Every hydrologic system (catchment) or aquifer (spring) can be then described by set of unique (individual) constant values of starting discharges Q_0 and set of unique (individual) recession coefficients (α or β) for each detected flow component (subregime).

In the process of hydrograph separation into individual flow components, each measured discharge value is understood as a result of superposition of one or several laminar flow components (exponential subregimes) and eventually, also turbulent flow components expressed by linear equation members. According to eq. (1), every measured discharge value Q_t is then determined just by a representative time t, i.e. theoretical elapsed time from the overall maximum discharge value Q_{max}. Subsequently, amounts discharged in different flow components (baseflow / groundwater runoff, subsurface runoff, surface runoff) or subregimes (basic laminar, additional laminar, several additional turbulent) can be calculated. As the exponential equation has no analytical solution, each real discharge value Q_t (having its theoretically elapsed time t from the Q_{max} overall maximum discharge value the master recession curve, described by set of pre-described equations) has to be solved by iteration process to obtain partial discharges for each subregime. In the iteration process, the two starting time inputs were usually set to be 0 and $1/\alpha_1$. Ten iteration procedures were sufficient to give result within the discharge reading accuracy. By substitution of the theoretically elapsed time t from absolute Q_{max} of the master recession curve to the partial equation of each individual flow component (sub-regime) we receive the actual partial discharge for the component/sub-regime analysed. To control the calculation, the total discharge has to be the sum of these partial discharges.

In such way, proportional amounts of different discharging subregimes can be calculated, both for every moment of evaluated period or for the whole evaluated period. They can be expressed both as discharges (in one moment) or as average discharges or better as volumes discharged within the duration of periods evaluated. Proportional amounts of different subregime volumes discharged in a certain moment can, of course, be linked to the content of various components analysed in the water in the same moment. This enables further analyses of water quantity-quality relation analyses, e.g. to obtain the end members of the theoretical mixture. Practical examples of separation, based on equations (4) and (5) both for watershed and karstic spring are shown on Figs. 2 and 3.

The advantage of the use of the master recession curve parameter's hydrograph separation method is that it allows clear solution for every discharge value. However, understanding of hydrologic system functions (the same discharge reflects the same water saturation or piezometric level in the watershed / aquifer) is a rough simplification. In reality, temporary unequal distribution of saturation levels is usual in catchment´s quantitative behaviour. Within aquifers, several piezometric levels should exist at least for each saturated system (small fissures, medium fissures, karst conduits), if not for their different parts. Time dependency of these individual piezometric levels then substantially differs one from another. Király (2003) described recession coefficient as a global parameter depending on global configuration of the karst aquifers (also form and extension), and does not recommend its use to for aquifer hydraulic properties calculations. The same author underlines the role of mixing processes and dilution within the aquifer and shows that improperly used chemical or isotopic hydrograph separation methods may lead to invalid inferences regarding the groundwater flow processes. In spite of all, facing practical problems, the discharge data can represent the only quantitative reference value that describes the whole system. Simplified hydrograph separation method, based on proper recession curves analyses of the whole discharge time series in such cases can help to distinguish and quantitatively express basic proportions of individual flow components. This method still may represent a perspective for quantitative referencing of flow components for further interpretations, or at least by its help the diminishing or starting point of individual flow components can be properly quantified.