

Priestorová variabilita hydrologických procesov v povodí Vydranky

Kočický, D., Marett, M.: Spatial Variability of Hydrological Processes in the Vydranka Catchment. *Životné prostredie*, 2016, 50, 3, p. 167 – 175.

Ecosystems and hydrological cycle interactions have long been a central topic in hydrology and ecosystem research. Abiotic landscape features and land cover affect the size and course of total water runoff, and understanding the processes involved provides the opportunity to influence surface runoff behaviour without technical landscape intervention. Changes in land use can significantly effect watershed hydrology; and here we employed a distributed parameter hydrology model to evaluate the effect of landscape structure on water balance components and the spatial variability of hydrological processes in the 65 km², 79.6 % forest-covered Vydranka watershed in eastern Slovakia. Average interception under current land use accounted for 11 % of total precipitation during the 2001–2013 calibration period. Although 83 % of total precipitation infiltrated the unsaturated soil zone, approximately one third of this amount percolated into the ground water aquifer and the remaining 17 % was shared by 14 % interflow and 4 % surface runoff. The largest proportion of the precipitation contributed to the base flow at 23 %. In addition to assessing the hydrological balance of the watershed, we also determined the following simulation outputs: the time series of individual components of the hydrological balance and runoff, and map outputs delineating spatial watershed distribution.

Key words: hydrological model, runoff, landscape structure, hydrological balance

Hydrologické procesy prebiehajú v krajine neustále. Každý z týchto procesov má svoj vlastný a veľmi dôležitý význam pri formovaní globálneho cyklu vody a energie. Abiotické vlastnosti krajiny a krajinná pokrývka sú faktory, ktoré výraznou mierou riadia dynamiku hydrologických procesov v povodí, veľkosť celkového odtoku, ako aj jeho jednotlivých zložiek: povrchového, podpovrchového a podzemného odtoku. Najmä krajinná pokrývka, ktorej štruktúru, množstvo a priestorové rozloženie vieme ovplyvniť, je zaujímavá z pohľadu možného manažmentu v krajine tak, aby sme obmedzili vznik povrchového odtoku, jeho priebeh a následne aj jeho účinky, pričom tieto môžu byť devastačné nielen pre krajinu ako takú, ale aj pre ľudskú spoločnosť z pohľadu materiálnych strát alebo, v horšom prípade, aj z pohľadu strát na ľudských životoch.

Hydrologické procesy v krajine sú zložitým a komplexným systémom, ktorého priestorovým rámcom je povodie. V podmienkach Slovenska prevažujú povodia s relatívne veľkými sklonmi, humídnyimi podmienkami s prevládajúcim vegetačným krytom (prirodzeným alebo kultúrnym), prípadne časť povodia môžu zaberat nepriepustné plochy, ako sú napríklad urbanizované územia. Hydrologické procesy prebiehajúce v takýchto povodiach môžeme konceptualizovať v hrubých rysoch nasledovným spôsobom: zrážky, ktoré dopadajú na nepriepustné plochy povodia, ak neodtekajú povrchovo, sa vyparujú priamo z povrchu a zároveň vyplňajú bezodtokové mikrodepresie terénu vo forme povrchovej retencie. Ak množstvo zrážok prekročí kapacitu po-

vrchovej retencie, dochádza už aj pri malých sklonoch k tvorbe povrchového odtoku. Po skončení dažďa sa voda z povrchových mikrodepresií postupne vyparuje a tvorí jednu zo zložiek úhrnného výparu. V prípade, že zrážky padajú pri záporných teplotách, dočasne sa akumulujú vo forme snehovej pokrývky a v závislosti od teploty dochádza k jej postupnému topeniu a následnej infiltrácii alebo povrchovému odtoku. Pokiaľ zrážky dopadajú na priepustnú, vegetáciou pokrytú časť povodia, časť zrážok sa zachytí na povrchu vegetácie ako intercepcia (t. j. zadržovanie zrážkovej vody v korunách drevín a krov a v prízemnej bylinnej vegetácii). Časť tejto vody sa vyparí ako ďalšia zložka úhrnného výparu. Intercepčná kapacita porastu závisí od druhu porastu, od jeho veku, hustoty a fenologickej fázy. Celková intercepcia je okrem vlastností porastu závislá aj od intenzity dažďa a rýchlosti vetra. Malé zrážky (do 5 – 10 mm za deň) s nízkou intenzitou môžu byť hustým porastom úplne zadržané, pričom časť zadržanej vody, prípadne aj celý úhrn zrážok sa počas dňa aj vyparí. Pri vyššej intenzite zrážok sa kvapky dažďa po dopade na povrch rastlín roztriešťa a zároveň v dôsledku mechanického účinku kvapiek sa listy a jemné časti rastlín uvoľňujú do pohybu, takže pri dažďoch s vysokou intenzitou ten istý porast zachytí menej vody ako pri dažďoch s menšou intenzitou. Časť zrážok, ktorá prepadne cez korunu alebo stečie po kmeni (efektívne zrážky), sa dostáva na povrch terénu, do ktorého začne ihneď infiltrovať. Ak je rýchlosť infiltrácie väčšia ako intenzita efektívnych zrážok, stihne všetka voda infiltrovať do pôdy, pričom si je nutné

uvedomiť, že intenzita infiltrácie nie je konštantná, ale sa s časom mení v závislosti od nasýtenia pôdneho profilu. Ak intenzita zrážok presiahne rýchlosť infiltrácie, začne prebytok vody, ktorá nestačila vsiaknuť, zapĺňať mikrodepresie povrchu terénu a po vyčerpaní kapacity povrchovej retencie začne voda odtekať v smere najväčšieho sklonu po povrchu ako povrchový odtok – ron. Voda spočiatku prúdi v tenkej vrstve, v dôsledku nepravidielnosti povrchu terénu však dochádza k jej miestnemu sústreďovaniu, začínajú sa vytvárať koncentrované prúdy vody, ktoré svojím eróznym pôsobením vytvárajú vo svahu ryhy, brázdy, výmole až riečne korytá, súčasť hydrografickej siete. Pretože horná vrstva pôdy (najmä na poľnohospodársky obrábaných plochách) má spravidla väčšiu priepustnosť ako nižšia, obrábaním nezasiahnutá vrstva, prípadne horninový substrát, dochádza na rozhraní týchto dvoch prostredí k obdobnému javu ako na rozhraní atmosféra – pôda: ak intenzita presakovania vody cez pôdu je väčšia ako vsakovacia schopnosť podložia, začne prebytok vody odtekať po povrchu menej priepustného prostredia v smere najväčšieho sklonu ako tzv. hypodermický alebo podpovrchový odtok. Voda, ktorá sa gravitačne pohybuje v nenasýtenej zóne pôdy alebo horninového prostredia, určuje rozloženie pôdnej vlhkosti v profile a jej časť, ktorá neodtečie hypodermickým odtokom a nespotrebuje sa na transpiráciu rastlín, môže preniknúť perkoláciou až k hladine podzemnej vody – do nasýtenej zóny horninového prostredia. Táto voda dotuje zásobu podzemnej vody v hydrogeologických kolektoroch nad relatívne nepriepustným podložíom. Podzemná voda sa pohybuje horninovým prostredím v závislosti od jeho vlastností a sklonu hladiny, pričom všeobecne smeruje k najnižším miestam terénu, kde môže vystupovať na zemský povrch (pramene, plošné vyvieracky), prípadne priamo do hydrografickej siete ako podzemný odtok a dotovať svojím podielom celkový odtok povrchových vôd. Časť podzemnej vody môže perkoláciou prenikať do hlbších horizontov horninového prostredia, z ktorých sa môže dostať opäť na zemský povrch už mimo uvažovaného povodia. Podzemná voda sa môže pôsobením kapilárnych síl pohybovať aj opačným smerom, môže dotovať nenasýtenú zónu a zabezpečovať tak vodou koreňovú zónu, z ktorej čerpá vodu vegetácia. Celkový výpar z povodia (straty evapotranspiráciou) je závislý predovšetkým od klimatických podmienok (teploty, zrážok, radiácie, vlhkosti, vetra) a je tvorený sumou evaporácie z povrchu rastlín, z terénnych depresí a z povrchu pôdy a transpirácie rastlín prostredníctvom koreňového systému a malej časti zásob podzemnej vody.

Ako vyplýva z tejto stručnej analýzy zrážkovo-odtokového procesu, komplexnosť a vnútorná prepojenosť tohto procesu je natoľko veľká, že iba čiastkovou analýzou niektorých subprocesov nie je možné kvantifikovať ich priestorovú a časovú dynamiku. Z tohto dôvodu ak chceme – vychádzajúc z načrtnutej schémy tvorby od-

toku – posúdiť vplyv jednotlivých abiotických či biotických vlastností krajiny (vegetáciu, pôdu, horninové prostredie, reliéf atď.) na mechanizmus rozdeľovania zrážkovej vody na jednotlivé zložky celkového odtoku a výparu z povodia, ako aj znamienko zmien v zložkách zrážkovo-odtokového procesu pri zmenách vlastností jednotlivých podmieňujúcich a určujúcich vlastností krajiny, je potrebné pristúpiť k využívaniu komplexných modelovacích nástrojov – hydrologických modelov.

Modelovanie hydrologickej bilancie a procesov tvorby odtoku v povodiach sa v dnešnej hydrológii stáva nezastupiteľným nástrojom na posudzovanie odtokového režimu pri zmenených klimatických podmienkach alebo pri zmene spôsobu využitia územia. V súčasnosti sa na simuláciu procesov tvorby odtoku v povodiach vo svete vyvíja a aplikuje množstvo modelov a systémov. Vzhľadom na to, že pôdny kryt a jeho vlastnosti sú priestorovo premenlivé, vhodným nástrojom najmä pri posudzovaní vplyvu zmeny spôsobu využitia územia na odtok sú zrážkovo-odtokové, fyzikálne orientované modely s priestorovo rozčlenenými parametrami. V príspevku sa ďalej zaoberáme modelovaním priestorovej diferenciacie hydrologických procesov v povodí na príklade povodia Vydranky.

Popis priestorovo distribuovaného hydrologického modelu

Prednosťou distribuovaných hydrologických modelov oproti koncepčným modelom so sústredenými parametrami, resp. semidistribuovaným modelom je, že umožňujú zohľadniť vnútornú heterogenitu povodia, resp. fyzikálnu podstatu hydrologických procesov (gridovo založené modely). Uvedené skupiny modelov delia povodie na nižšie priestorové jednotky, ktoré sú popísané súborom parametrov opisujúcich hydrologicky relevantné vlastnosti jednotlivých zložiek krajiny a predkladajú približne rovnakú hydrologickú odozvu. V praxi to potom znamená, že okrem simulácie odtoku v záverečnom profile modelovaného povodia sú využiteľné aj na hodnotenie lokálnej hydrologickej odozvy v povodí. Takýto typ modelov je teda nezastupiteľný na hodnotenie dopadu zmeny krajinnnej štruktúry na odtok z povodia, hodnotenia dopadu klimatickej zmeny, manažment povodia alebo pri predpovediach na povodiach bez merania prietokov.

Použitý zrážkovo-odtokový model *ISSOP hydro model* (Kočícký, Mareta, 2014) vychádza zo štruktúry fyzikálne orientovaného modelu *WetSpa* (Wang et al., 1996; Liu, De Smedt, 2003), ktorého komponenty a programová štruktúra bola upravená tak, aby bol vhodný na modelovanie odtoku zo zrážok a topenia snehu v podmienkach Slovenska. Tento fyzikálne orientovaný zrážkovo-odtokový model s rozčlenenými parametrami rozdeľuje povodie štvorcovou sieťou na rovnomerné priestorové jednotky, v ktorých počíta hydrologickú bilanciu a simuluje pohyb

vody do záverečného profilu povodia v zmysle konceptualizácie odtokového procesu načrtnutého v úvodnej kapitole. Simulovaný hydrologický systém sa skladá zo štyroch riadiacich zložiek: vegetačného krytu, povrchu pôdy, koreňovej zóny a nasýteného kolektora podzemnej vody, pričom rozhodujúca premenná ovplyvňujúca hydrologické procesy (povrchový odtok, reálnu evapotranspiráciu, hypodermický odtok a perkoláciu) je obsah pôdnej vlhkosti. Vstupom do modelu sú časové rady zrážkových úhrnov a teplôt. Časové rady sú extrapolované do priestoru voliteľne Thiessenovými polygónmi, vertikálnym gradientom alebo interpolačnou metódou inverzných vzdialeností, zahŕňajúcou aj korekciu nadmorskej výšky (De Roo, 2003). Intercepčná kapacita je stanovená na základe zákona zachovania hmoty so zahrnutím sezónneho kolísania, ktoré je funkciou indexu listovej pokrývnosti (*Leaf Area Index* – LAI) a druhu vegetácie (Liu, De Smedt, 2003). Akumulácia a topenie snehu sú odvodené metódou *degree/day* na základe ich závislosti od teploty vzduchu a úhrnu zrážok a oslnenia (Martínez, Rango, Major, 1983; Kočický, Maretta, 2014). Potenciálna evapotranspirácia sa v modeli počíta pomocou vzťahu podľa Blaneyho, Criddlea (1950), kde potenciálna evapotranspirácia závisí od teploty a maximálnej miery slnečného svitu, ktorá v modeli vystupuje ako priestorový parameter (index oslnenia). Aktuálna evapotranspirácia z pôdy a vegetácie sa počíta pomocou vzťahu podľa Thornthwaitea, Mathera (1955) ako funkcia potenciálnej evapotranspirácie, druhu vegetácie, rastovej fázy a aktuálnej vlhkosti pôdy. Intenzita infiltrácie je predovšetkým funkciou začiatkovej pôdnej vlhkosti, zrážkových, povrchových a pôdnych charakteristík v bežných podmienkach (McCuen, Rawls, Brakensiek, 1981). Interakcia pôdnej a podzemnej vody je stanovená Darcyho zákonom. Závisí od koeficienta filtrácie, hĺbky koreňovej zóny a obsahu vody v pôde. Výpočet podpovrchového odtoku vychádza z Darcyho zákona a metódy kinematickej vlny. Transformácia odtoku na svahoch a v riečnej sieti je v modeli riešená metódou lineárnej aproximácie difúznej vlny, ktorá umožňuje analytické vyjadrenie transformácie odtoku. Základné vstupy do modelu tvoria hydrologické a klimatické vstupné údaje v dennom alebo hodinovom kroku a rastrové digitálne vrstvy (digitálny model reliéfu, mapa využitia územia, mapa pôdnych druhov, resp. ďalšie podľa dostupnosti údajov), na základe ktorých sa odvodzujú priestorové parametre modelu. Okrem rozsiahleho množstva fyzikálne orientovaných parametrov, odvodených na základe fyzickogeografických vlastností povodia, vstupuje do modelu 11 globálnych parametrov, ktoré sú kalibrovateľné.

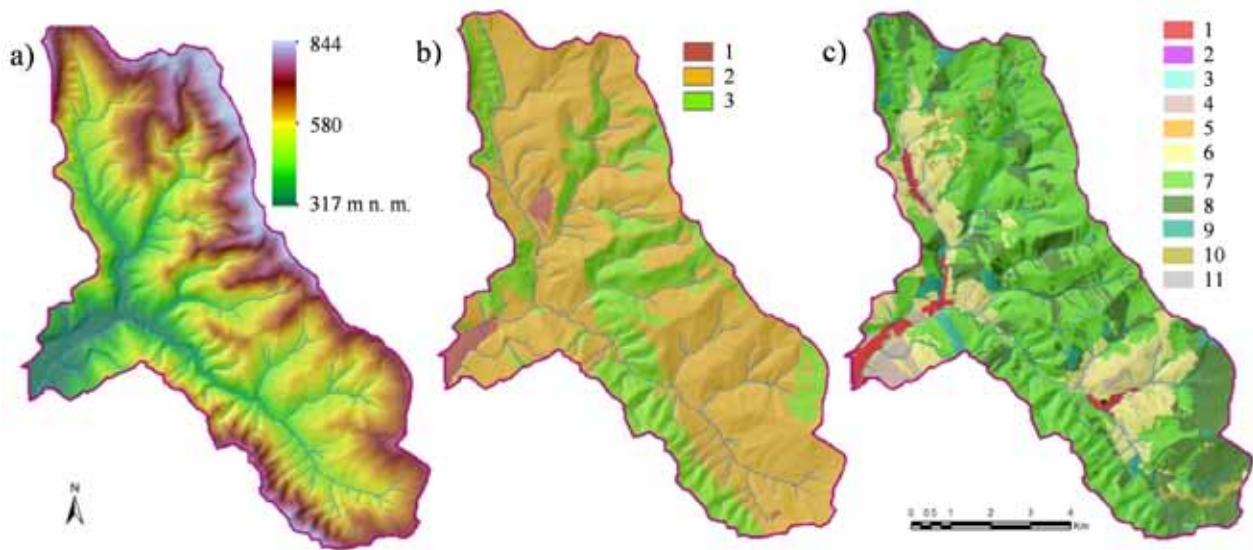
Charakteristika modelového povodia Vydranky a vstupné údaje

Povodie Vydranky sa nachádza v povodí Bodrogu na severovýchodnom Slovensku v geomorfologickom celku

Laborecká vrchovina. Rozloha povodia je 65,03 km². Povodie má prevažne vrchovinný charakter s priemerným sklonom 11,5° a výškovým rozsahom 313 – 842 m n. m. Hustota riečnej siete je 1,49 km.km⁻² a priemerný ročný prietok v záverečnom profile je 0,85 m³.s⁻¹. Z geologického hľadiska leží povodie vo flyšovom pásme s príkrovo-vrásovou stavbou. Povrch je intenzívne rozčlenený do sústavy chrbtov a erózných brázd pretiahnutých zo severozápadu na juhovýchod. Z hydrogeologického hľadiska je povodie tvorené flyšovými súvrstviami s prevažou ílovca. Pieskovcový flyš má menšie plošné zastúpenie viazané na vyvýšené časti a chrbty. Pre povodie je charakteristická malá priepustnosť a slabá zvodnenosť týchto súvrstiev. Pôdy v povodí sú zväčša relatívne plytké s hĺbkou nepresahujúcou 40 cm. Len v dnových častiach brázd dosahujú väčšiu hĺbku. Prevládajú rôzne subtypy kambizemí a rankre, menšie plochy v nivách sú tvorené fluvizemou. Zo zrnitostného hľadiska ide väčšinou o pôdy prachovito-hlinité, miestami hlinité s vysokým obsahom skeletu. Vzhľadom k rozpätiu nadmorských výšok povodie zasahuje do viacerých klimatických oblastí. Povodie má mierne teplú, veľmi vlhkú až mierne chladnú klímu s priemerným ročným úhrnom zrážok v rozpätí 900 – 1 220 mm a priemernou ročnou teplotou vzduchu v rozpätí 5,5 – 7,1 °C za obdobie 1961 – 2010 (Klimatický atlas Slovenska, 2015). Súčasná krajinná štruktúra výrazne koreluje s reliéfom, vyvýšené časti a chrbty sú zväčša zalesnené a neosídlené, erózne brázdny sú väčšinou odlesnené a premenené na trvalé trávne porasty, v menšej miere na ornú pôdu. Lesy pokrývajú 79 % rozlohy povodia. V drevinovom zložení prevažujú listnaté dreviny, ktoré zaberajú 75,6 % celkového lesného krytu. Dominuje buk lesný (*Fagus sylvatica* L.). Ihličnaté lesy predstavujú 11,3 % a zmiešané 13,1 % rozlohy lesa. Ďalšími prvkami využitia krajiny sú lúky (15 %), orná pôda (2,25 %) a sídelná zástavba (1,76 %).

Základnými vstupnými digitálnymi vrstvami pre použitý zrážkovo-odtokový model s priestorovo-rozčlenenými parametrami sú *digitálny model reliéfu (DMR)*, *mapa využitia krajiny* a *mapa pôdnych druhov* (obr. 1). Digitálne vrstvy na modelovanie odtoku boli vytvorené v rastrovom formáte s rovnakou veľkosťou bunky 20 x 20 m. Ďalšie digitálne údaje vo vektorovom tvare predstavuje mapa rozvodia s riečnou sieťou. Pomocou programovej nadstavby v prostredí ArcGIS boli odvodené jednotlivé priestorovo distribuované parametre modelu.

Z *DMR* boli odvodené tieto vrstvy/mapy: (i) mapa smerov odtoku, (ii) mapa akumulácie odtoku, (iii) mapa riečnej siete vygenerovaná z mapy akumulácie odtoku na základe stanovenej prahovej hodnoty pre riečnu sieť, poradie tokov podľa metódy Shreva, ktoré sa používa pri interpolácii koeficienta drsnosti v korytách tokov, (iv) mapa sklonov svahov povodia a riečnej siete, (v) mapa hydraulického polomeru pre svahy povodia a riečnu sieť pre vybranú návrhovú povodeň (napr. 2-, 10- alebo



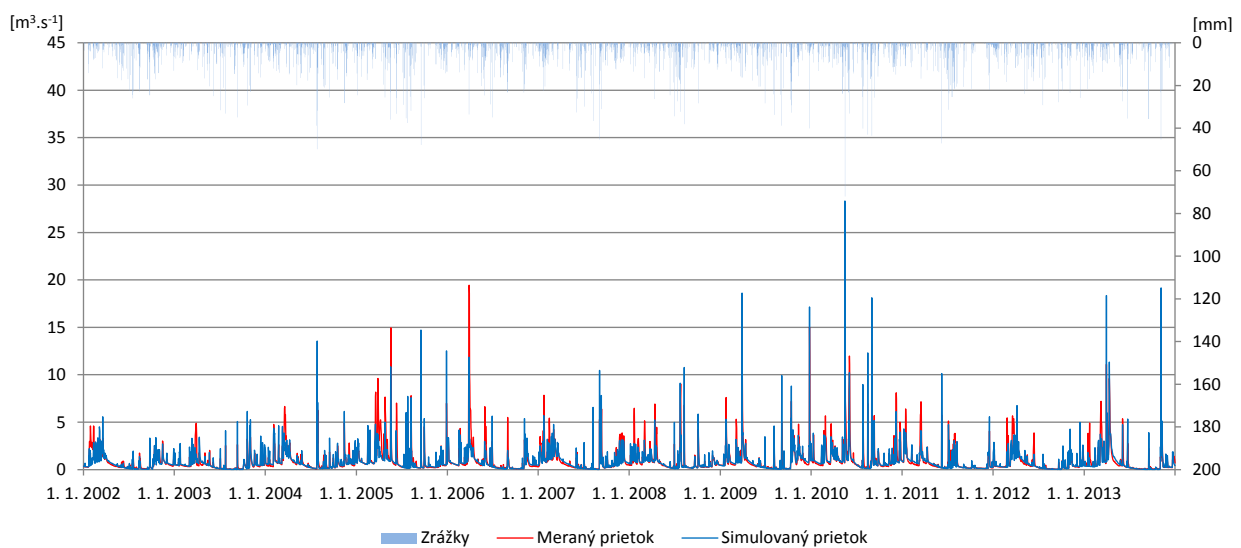
Obr. 1. Základné priestorové vstupy pre odvodnenie parametrov zrážkovo-odtokového modelu ISSOP: a) digitálny model reliéfu (nadmorská výška), b) pôdne druhy (zrornosť), c) krajinná pokrývka. Zdroj: vlastné spracovanie
 Vysvetlivky: Zrornosť: 1 – piesočnato-hlinitá, 2 – hlinitá, 3 – prachovitá; Krajinná pokrývka: 1 – sídelná zástavba, 2 – priemyselné, obchodné a dopravné areály, 3 – areály sídelnej vegetácie, športu a rekreácie, 4 – orná pôda, 5 – trvalé kultúry, 6 – lúky a pasienky, 7 – listnaté lesy, 8 – zmiešané lesy, 9 – ihličnaté lesy, 10 – prechodné lesokroviny, 11 – areály s riedkou vegetáciou

100-ročnú), (vi) mapa subpovodí vytvorená na základe zadanej prahovej hodnoty, (vii) mapa indexu oslnenia, vypočítaná ako podiel trvania oslnenia jednotlivkej bunky v danom dni a trvania oslnenia počas celého roka.

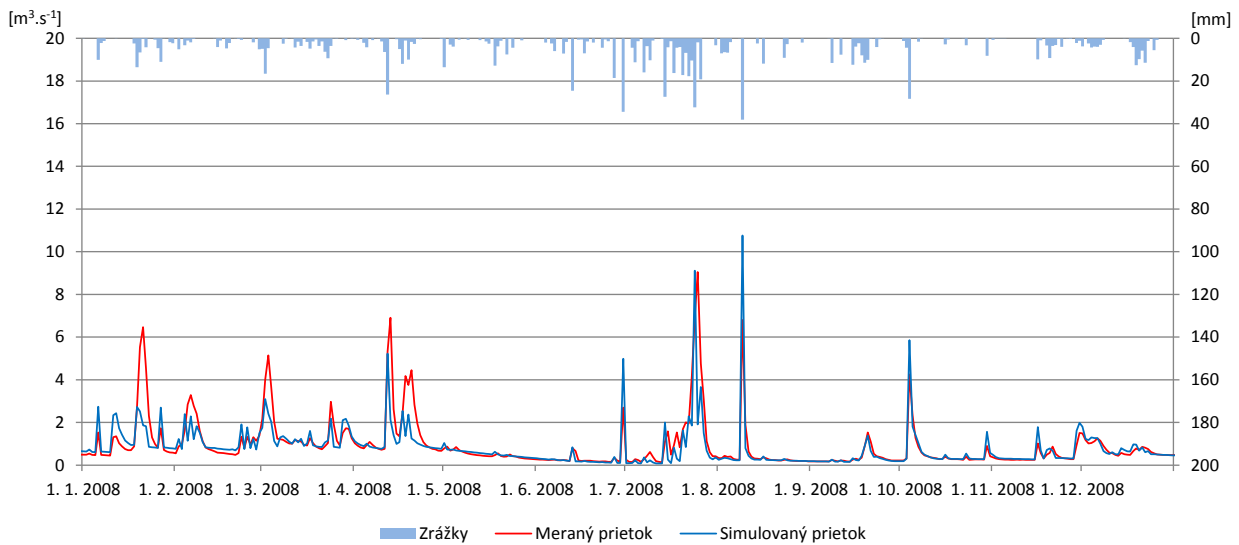
Z máp pôdnych druhov, obsahu skeletu a humusu boli vygenerované vrstvy parametrov hydrofyzikálnych vlastností pôdy: (i) koeficient filtrácie v nasýtenej zóne [$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$], (ii) pórovitosť [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$], (iii) poľná vodná ka-

pacita [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$], (iv) zvyšková pôdna vlhkosť [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$], (v) index rozdelenia pórov v pôde podľa ich veľkosti [bezrozmerný index], (vi) bod vädnutia rastlín [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$], začiatková pôdna vlhkosť bola stanovená použitím topografického vlhkosťného indexu.

Z mapy využitia krajiny boli odvodené tieto vrstvy parametrov: (i) hĺbka koreňovej zóny [m], (ii) maximálna a minimálna kapacita intercepcie [mm], (iii) Manningov



Obr. 2. Porovnanie meraných a simulovaných priemerných denných prietokov po kalibrácii globálnych parametrov modelu (potok Vydranka v Medzilaborciach). Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP



Obr. 3. Porovnanie meraných a simulovaných priemerných denných prietokov po kalibrácii globálnych parametrov modelu (potok Vydranka v Medzilaborciach, rok 2008). Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP

súčiniteľ drsnosti pre svahy a riečnu sieť, ktorý závisí od spôsobu využívania krajiny a rádu tokov, a (iv) index listovej pokrývnosti.

Na základe rovníc transformácie odtoku difúznou vlnou sa v prostredí GIS vytvorili vrstvy charakteristík prúdenia vody na svahoch a v riečnej sieti: rýchlosť prúdenia vody vypočítaná Chezyho rovnicou na základe Manningovho súčiniteľa drsnosti n , hydraulického polomeru a sklonu, čas pohybu vody (t_0) z každej bunky po záverečný profil povodia určený na základe rýchlosti prúdenia a dĺžky odtoku na svahu alebo v riečnej sieti, súčiniteľa difúzie (D) a celerity (c), smerodajná odchýlka (Dt) času pohybu vody z každej bunky po záverečný profil povodia.

Vstupom do modelu boli 4 typy hydrometeorologických údajov: denné úhrny zrážok z bodových meraní v staniách $[mm \cdot deň^{-1}]$, denné úhrny potenciálnej evapotranspirácie vypočítané v staniách $[mm \cdot deň^{-1}]$, priemerné denné hodnoty teploty vzduchu z bodových meraní v staniách $[°C]$, priemerné denné prietoky v záverečnom profile povodia $[m^3 \cdot s^{-1}]$.

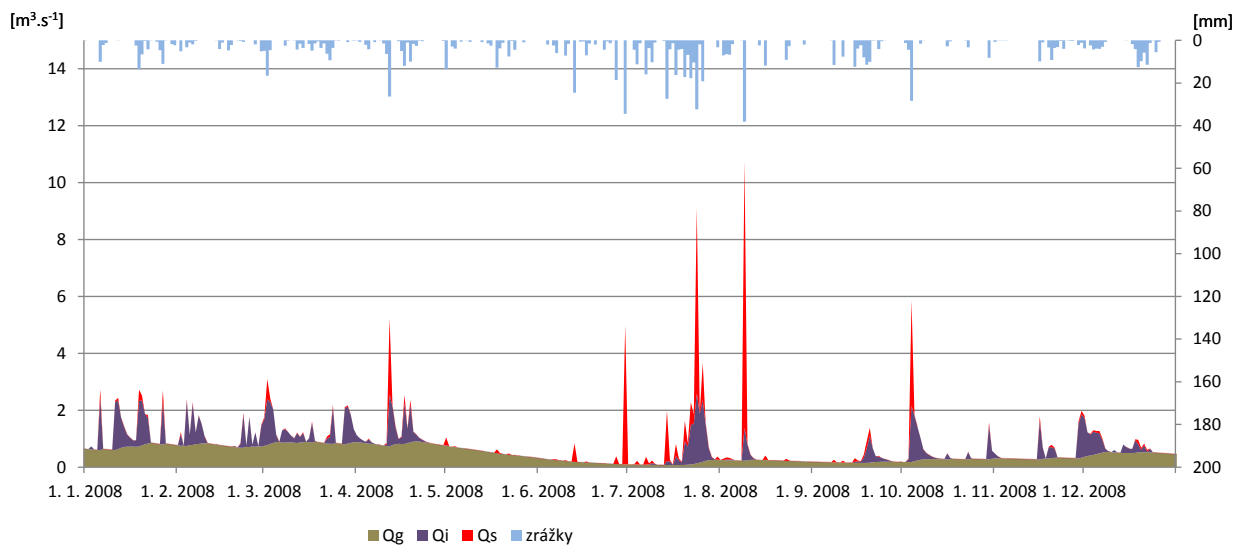
Zrážky sú v každej časovej jednotke rozložené do jednotlivých buniek povodia metódou inverzne váženej vzdialenosti (*Inverse Distance Weighted* – IDW). Potenciálna evapotranspirácia (PET) je v každej časovej jednotke a bunke vypočítaná pomocou vzťahu podľa Blaneyho, Criddlea (1950) na základe teploty vzduchu a indexu oslnenia. Teplota vzduchu je v každej bunke a časovej jednotke vypočítaná na základe nadmorskej výšky bunky a regresného vzťahu medzi teplotou vzduchu v staniách a nadmorskou výškou staníc. Vplyv expozície a sklonu je zahrnutý do výpočtu PET prostredníctvom indexu oslnenia, na získanie viacnásobného regresného vzťahu, zahŕňajúceho okrem nadmorskej výšky aj expo-

zíciu a sklon svahu však nebol v území dostatok klimatologických staníc s teplotnými radmi. Meraný prietok slúži na porovnanie so simulovaným prietokom a následným vyhodnotením presnosti modelu, na samotnú simuláciu odtoku nie je potrebný.

V modelovom povodí sme použili údaje z 19 zrážkomerných a 4 klimatických staníc. Údaje tvorili denné úhrny zrážok (zo zrážkomerných a klimatických staníc) a teplota vzduchu v dennom kroku (z klimatických staníc). Ako vstup do modelu sa použili 13-ročné časové rady z obdobia 2001 – 2013.

Kalibrácia modelu a simulácia prvkov vodnej bilancie

Cieľom kalibrácie zrážkovo-odtokového modelu bolo pre každé vybrané povodie určiť také globálne parametre modelu, pri použití ktorých bude dosiahnutá najlepšia zhoda medzi meranými a simulovanými priemernými dennými prietokmi v záverečnom profile povodia. Globálne parametre modelu sú plošne rovnaké pre celé povodie a súvisia s pôdnymi vlastnosťami, využitím územia a tvorbou odtoku na povodí. Tieto parametre majú podobne ako vstupné údaje významný vplyv na výsledok simulácie procesov na povodí. Zrážkovo-odtokový model ISSOP bol kalibrovaný v dennom kroku pre 12-ročné obdobie od 1. júna 2001 do 31. decembra 2013. Odhad parametrov prebiehal spôsobom, pri ktorom sú minimalizované rozdiely medzi meranými a simulovanými prietokmi. Použili sme optimalizačnú procedúru *Shuffled Complex Evolution Method* – SCE-UA (Duan et al., 1992; Vrugt et al., 2003) založenú na evolučnom algoritme, ktorá bola viacerými štúdiami označená ako vhodná na určenie optimálnych parametrov hydrologického modelu. Na určenie predikčnej schopnosti modelu vy-



Obr. 4. Hydrogram celkového odtoku konštruovaný superpozíciou hydrogramov jednotlivých zložiek (potok Vydranka v Medzilaborciach, rok 2008). Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP

Vysvetlivky: Qg – základný odtok, Qi – hypodermický odtok, Qs – povrchový odtok

jadrenej mierou zhody medzi meranými a simulovanými prietokmi bol použitý koeficient podľa Nasha, Sutcliffea (1970) a ďalšie štatistické ukazovatele.

Na obr. 2 a 3 sú prezentované ukážky porovnania výsledkov simulácií. Vyjadrujú priebehy meraných priemerných denných prietokov a denných úhrnov zrážok na povodie, ako aj simulovaných hodnôt priemerného denného prietoku pre celé obdobie a vybraný rok. Po kalibrácii parametrov modelu pre povodie v dennom kroku považujeme dosiahnutú zhodu medzi simulovanými a meranými priemernými prietokmi za veľmi dobrú, o čom svedčia ako hodnoty podľa uvedeného koeficienta (0,73), tak aj grafické porovnanie simulovaných a meraných priemerných denných prietokov. Napriek dobrej dosiahnutej zhode podrobná štatistická validácia modelu pre celé modelované obdobie, ako aj pre jednotlivé ročné obdobia a zrážkové a bezzrážkové periódy zvlášť ukázala niektoré systematické a náhodné chyby simulácie. Z validácie je zrejмый fakt, že model má tendenciu podhodnocovať prietok vo všetkých hodnotených periódach. Za rozhodujúci zdroj chýb považujeme pritom nedostatočnú hustotu a kvalitu vstupných meteorologických údajov. Z tohto dôvodu dochádza k situácii, že niektoré zrážkové epizódy neboli zrážkomernými stanicami vôbec zachytené a, naopak, niektoré lokálne prívalové zrážky boli neadekvátne extrapolované na veľkú časť povodia. Ďalším problémom bolo, že klimatologické stanice merajúce teplotu sa nachádzajú všetky v nadmorskej výške do 400 m, pričom najvyššie lokality povodia presahujú 800 m n. m. To zapríčiňuje, že vertikálny denný teplotný gradient odvodený modelom, použitý na modelovanie priestorovej distribúcie priemernej dennej teploty je často nadhodnotený alebo podhodnotený. V dôsledku toho nastávajú

značné nepresnosti predovšetkým pri modelovaní topenia a akumulácie snehu, keď sa teplota pohybuje okolo nuly. Nezanedbateľný vplyv na presnosť simulácie má aj skutočnosť, že denné úhrny zrážok na stanicach sú merané od siedmej hodiny ráno do siedmej hodiny nasledujúceho dňa a ich úhrn sa vzťahuje k predchádzajúcemu dňu. To spôsobuje niekedy zdanlivý 1-dňový posun v kulminácii prietokových vln.

Priestorová a časová variabilita zložiek odtoku

Okrem celkového odtoku z povodia sú výstupmi simulácie modelom ISSOP aj časové rady jednotlivých zložiek odtoku a hydrologickej bilancie povodia a mapové výstupy, vyjadrujúce ich priestorovú distribúciu v povodí. Tab. 1 sumarizuje priemerné ročné hodnoty jednotlivých členov hydrologickej bilancie za modelované obdobie 1. januára 2001 – 31. decembra 2013. Celkove sa len asi 11 % ročného úhrnu zrážok zachytí v intercepcii. Najväčšia časť zrážok infiltruje do pôdy (cca 83 %) a následne znížená o evapotranspiráciu odteká podpovrchovým odtokom (14 %) alebo perkoluje do nasýtenej zóny (28 %). Celkový odtok z povodia tvorí približne 41 % zrážok, zvyšok sú straty evapotranspiráciou. Celkový povrchový odtok je relatívne nízky (4 %) z dôvodu jeho epizodického výskytu len počas výrazných zrážkových úhrnov alebo topenia snehu, ale tvorí hlavnú zložku kulminačných prietokov.

Časovú dynamiku jednotlivých zložiek odtoku v rámci vybraného roku zobrazuje obr. 4. Dobře dokumentuje podiel jednotlivých zložiek odtoku na celkovom odtoku počas roka. Z hydrogramov na obr. 4 je viditeľný relatívne nízky podiel zložky základného

Tab. 1. Simulované ročné priemery zložiek hydrologickej bilancie v povodí Vydranky v období 2001 – 2013

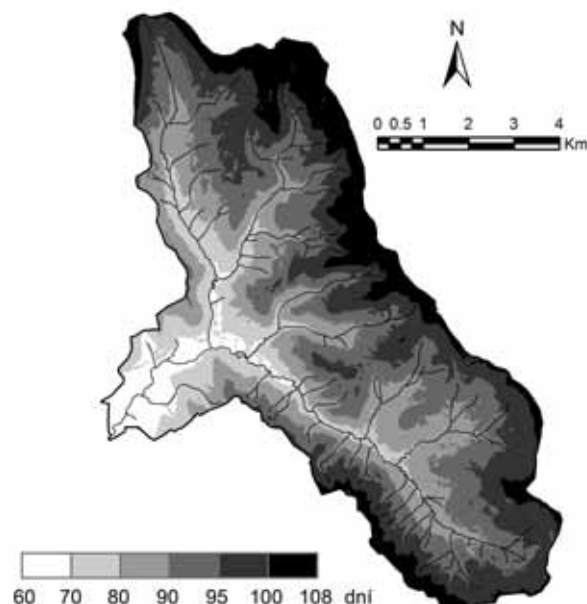
Priemerný ročný úhrn zložiek hydrologickej bilancie [mm]								
zrážky	interceptcia	infiltrácia	evapotranspirácia	perkolácia	povrchový odtok	podpovrchový odtok	základný odtok	celkový odtok
977,84	111,33	807,38	558,82	276,67	39,42	141,26	217,91	398,58

Zdroj: vlastné spracovanie, výstupy modelu ISSOP

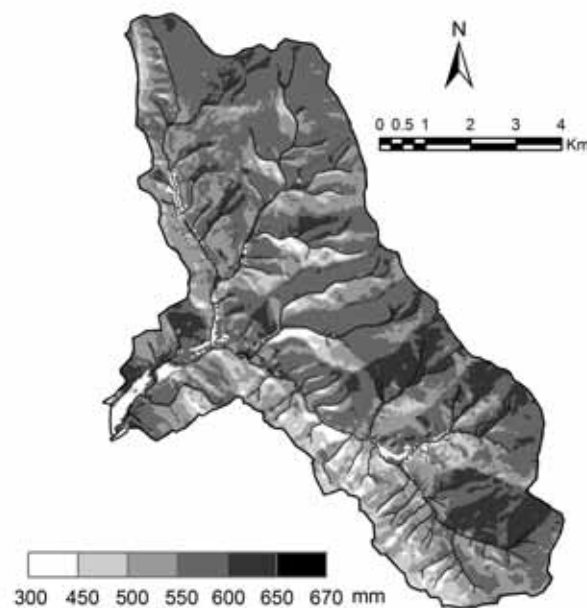
odtoku na kulminačných prietokoch, aj keď v ročnej bilancii je to najväčšia zložka odtoku, pričom jej celkové kolísanie je relatívne mierne s maximami v jarných mesiacoch a minimami v druhej polovici leta a na jeseň. Zrejmé je, že vzhľadom k prevládajúcej geologickej štruktúre (slabo priepustné horniny flyšového pásma) prakticky nedochádza k dopĺňovaniu zásob podzemnej vody počas krátkych intenzívnych dažďov v letnom období. Rozhodujúca časť zrážok odtečie povrchovým alebo hypodermickým odtokom v pôdnom profile. Zvyšná voda akumulovaná v pôdnom profile sa v tomto období spotrebuje na evapotranspiráciu skôr, ako by stihla perkolovať do kolektorov podzemných vôd.

Použitý distribuovaný zrážkovo-odtokový model, ktorý simuluje dynamiku hydrologických procesov v gridovej mriežke (v tomto prípade 20 x 20 m) umožnil modelovať a následne vizualizovať a analyzovať aj priestorovú distribúciu jednotlivých zložiek hydrologickej bilancie, ktorá je podmienená heterogenitou krajinej štruktúry povodia.

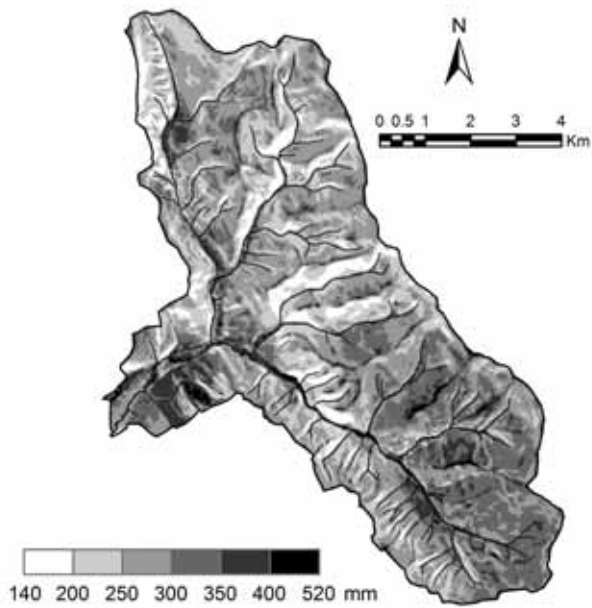
Priestorová distribúcia priemernej ročnej tepoty vychádza z koncepcnej štruktúry použitého modelu, ktorý počíta teplotný gradient na každý deň na základe meraných teplôt v použitých staniách a ich nadmorskej výšky. Aj keď v jednotlivých dňoch je veľkosť gradientu značne rozdielna (pomerne často sa v zimnom období vyskytujú aj inverzné situácie), v dlhodobom priemere sa ukazuje ako zrejma vertikálna zonalita priemernej ročnej teploty vzduchu, ktorá je v modelovom povodí v rozmedzí 4,6 až 8,2 °C. Modelované rozloženie zrážkových úhrnov v povodí je relatívne homogénne od 900 do 1 000 mm ročne a čiastočne vykazuje vertikálnu zonalnosť, ale predovšetkým sa prejavuje ich nárast smerom k východnej časti povodia. Tento efekt môže byť spôsobený aj rozmiestnením zrážkomerných staníc, ktorých nadmorská výška smerom k východu mierne narastá. Modelovaná priestorová distribúcia počtu dní so snehovou pokrývkou vykazuje, podobne ako teploty, jednoznačnú výškovú zonalitu s rozsahom hodnôt 60 dní v najnižších lokalitách po 109 dní vo vrcholových polohách (obr. 5). Pre priemerný ročný úhrn aktuálnej evapotranspirácie je charakteristická vysoká heterogenita jeho priestorovej distribúcie v povodí, čo je zapríčinené synergickým vplyvom viacerých faktorov riadiacich tento proces (obr. 6). Predovšetkým sa jedná o do istej miery protichodné pôsobenie faktora teploty a zrážok. Jednoznačne je však možné identifikovať vplyv oslnenia na evapotranspiráciu, kde jednoznačne vyššia evapotranspirácia pre-



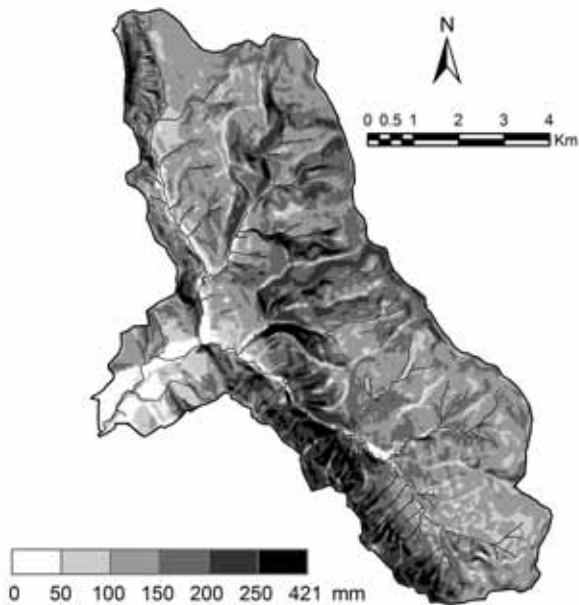
Obr. 5. Priestorová distribúcia priemernej ročnej počtu dní so snehovou pokrývkou, modelovaná metódou degree/day factor. Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP



Obr. 6. Priestorová distribúcia priemernej ročnej úhrnu aktuálnej evapotranspirácie. Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP



Obr. 7. Priestorová distribúcia priemerného ročného úhrnu základného odtoku. Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP



Obr. 8. Priestorová distribúcia priemerného ročného úhrnu podpovrchového odtoku. Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP

bieha na južne orientovaných svahoch s dostatočným príkonom slnečnej radiácie. Menej výrazne sa prejavuje vplyv krajiny pokrývky, pričom najnižšie úhrny evapotranspirácie je možné pozorovať v zastavaných územiach a mierne vyššie v zalesnených častiach. Na celkovú priestorovú distribúciu evapotranspirácie majú vplyv aj ďalšie faktory (pôdny druh, hĺbka pôdy, fakto-

ry reliéfu a pod.), ale ich vplyv nie je jednoznačne identifikovateľný. Na priestorovú distribúciu priemerného ročného úhrnu intercepce jednoznačne najviac vplyva krajinná pokrývka, pričom v zastavaných územiach sa intercepčia blíži k nule a, naopak, najvyššia je v ihličnatých porastoch, kde dosahuje až 175 mm ročne. Výrazne sa prejavuje aj dosah expozície, kde sa v dôsledku väčšieho príkonu slnečného žiarenia a tým aj väčšej evapotranspirácie z intercepce zväčšuje aj celková intercepčia. Z priemerného ročného úhrnu základného odtoku vyplýva, že dosahuje najvyššie hodnoty v málo sklonitých, dobre priepustných nivných oblastiach v okolí tokov (obr. 7). Ďalej je možné sledovať vyššie úhrny základného odtoku v menej sklonitých častiach svahov s tendenciou jeho zvyšovania v oblastiach bez lesného krytu, resp. v severne orientovaných oblastiach, kde sú menšie straty evapotranspiráciou. Najnižšie úhrny podzemného odtoku sú na južne orientovaných svahoch s veľkým sklonom. Zreteľný je aj nárast podzemného odtoku smerom na východ, súvisiaci s nárastom modelovaného zrážkového úhrnu v tomto smere. V relatívne sklonitých a humídnych podmienkach modelového povodia tvorí podpovrchový odtok významnú zložku odtoku predovšetkým v poklesovej fáze povodňových vln. Jeho tvorba v povodí je značne nerovnomerná a, ako ukazuje mapa priemerného ročného úhrnu podpovrchového odtoku (obr. 8), je viazaná predovšetkým na svahy s dostatočne veľkým sklonom bez ohľadu na krajinnú pokrývku. Naopak, v mierne členitých územiach je zanedbateľný.

Ako sme už konštatovali, povrchový odtok tvorí kulmináčnu zložku povodňových vln v záverečnom profile modelového povodia. Priestorová distribúcia jeho tvorby vykazuje značnú heterogenitu a je do určitej miery komplementárna k distribúcii podzemného odtoku. Z priemerných ročných úhrnov vyplýva, že najvyššie úhrny je možné pozorovať v oblastiach s vysokým sklonom a malou hĺbkou pôdy, kde až polovica zrážok odtečie touto formou bez ohľadu na krajinnú pokrývku, zatiaľ čo v povodí sú rozsiahle územia, kde sa povrchový odtok takmer netvorí (obr. 9). Ide predovšetkým o oblasti s malým sklonom a hlbšími, dobre priepustnými pôdami. Jednoznačne najvyšší odtok je možné pozorovať v zastavených územiach. Na priestorovú distribúciu povrchového odtoku má zreteľný vplyv aj priestorová distribúcia intenzity jednotlivých zrážkových epizód. Je možné takisto pozorovať jednoznačne vyšší povrchový odtok vo všetkých nezalesnených územiach oproti lesu.

* * *

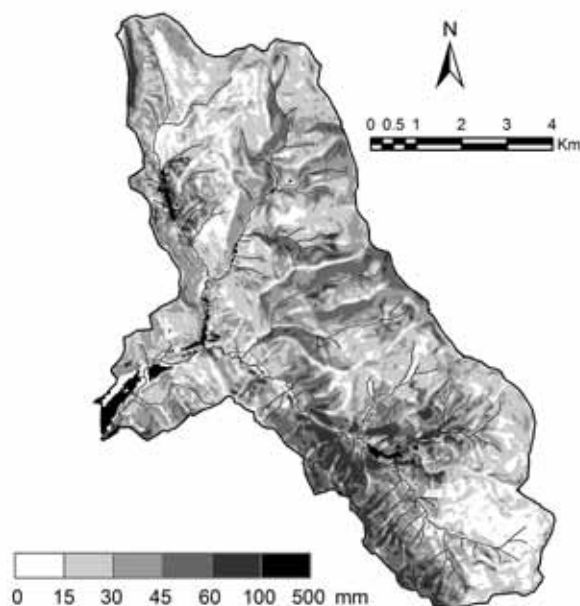
V príspevku sme vyhodnotili možnosti využitia hydrologického modelu s priestorovo rozčlenenými parametrami na hodnotenie priestorovej variability hydrologických procesov. Veľmi dobré výsledky kalibrácie

modelu nás oprávňujú predpokladať, že takýto druh modelov umožňuje skúmať a hodnotiť vplyv priestorovej diferenciácie krajinej štruktúry na dynamiku hydrologických procesov a prezentované závery vytvárajú podmienky na využitie predloženého prístupu v oblasti aktuálnych problémov, ako je vplyv zmien krajinej štruktúry na odtokové procesy, ale aj v oblasti návrhu manažmentových opatrení v povodí. Pre využitie hydrologických modelov v týchto oblastiach je mimoriadne dôležitá podrobná a vierohodná znalosť o priestorovej distribúcii parametrov hydrologického prostredia, keďže v tomto prípade nie je dôležitá len simulácia odtoku v koncovom profile, ale aj znalosť priestorovej variability dynamiky hydrologických procesov v celom povodí tak, aby jednotlivé opatrenia a návrhy mohli byť priestorovo cielene lokalizované a následne mohol byť odhadovaný ich dopad. Poznanie priestorovej variability hydrologických procesov potom umožňuje diferencovanie a kvalifikovane usmerňovať ľudské aktivity v povodí, výsledky môžu byť použité v komplexných systémoch na podporu rozhodovania a prispieť k riešeniu konfliktov medzi záujmami na poskytovanie rôznych ekosystémových služieb. Na druhej strane treba upozorniť aj na skutočnosť, že spoľahlivosť výsledkov získaných pomocou hydrologických modelov závisí od množstva faktorov (Wagener, 2007). Zatiaľ čo kalibrácia s využitím údajov z dostatočne dlhého obdobia podporuje spoľahlivosť výsledkov získaných pomocou simulácií, dostupnosť a kvalita vstupných údajov a parametrizácia jednotlivých procesov v modeli môžu predstavovať výrazné obmedzenia.

Táto práca vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Výskum a vývoj pre projekt Integrovaný systém pre simuláciu odtokových procesov, ITMS: 26220220066, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

Literatúra

- Blaney, H. F., Criddle, W. D.: Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological Irrigation Data. Technical Paper No. 96. Washington, D.C.: US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950, 48 p.
- De Roo, A., Gouweleeuw, B., Thielen, J., Bartholmes, J., Bongioannini-Cerlini, P., Todini, E., Bates, P., Horritt, M., Hunter, N., Beven, K., Pappenberger, F., Heise, E., Rivin, G., Hills, M., Hollingsworth, A., Holst, B., Kwadijk, J., Reggiani, P., van Dijk, M., Sattler, K., Sprokkereef, E.: Development of a European Flood Forecasting System. International Journal of River Basin Management, 2003, 1, 1, p. 49 – 59.
- Duan, Q., Gupta, V. K., Sorooshian, S.: Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. Water Resource Research, 1992, 28, p. 1015 – 1031.
- Klimatický atlas Slovenska. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2015, 132 s.
- Kočický, D., Mareta, M.: Integrovaný systém pre simuláciu odtokových procesov. Dokumentácia a referenčná príručka. Banská



Obr. 9. Priestorová distribúcia priemerného ročného úhrnu povrchového odtoku. Zdroj: vlastné spracovanie, výstup modelu ISSOP

- Štiavnica: Esprit, s. r. o., 2014, 435 s. (ms.).
- Liu, Y., De Smedt, F.: WetSpa Extension, a GIS-Based Hydrological Model for Flood Prediction and Watershed Management. Documentation and User Manual. Brusel: Vrije Universiteit Brusel, 2003, 118 p.
- Martinez, J., Rango, A., Major, E.: The Snowmelt-Runoff Model (SRM) User's Manual. Washington, D.C.: NASA Reference Publication 1100, 1983, 177 p.
- Mccuen, R. H., Rawls, W. J., Brakensiek, D. L.: Statistical Analysis of the Brooks-Corey and the Green-Ampt Parameters across Soil Textures. Water Resources Research, 1981, 17, 4, p. 1005 – 1013.
- Nash, J. E., Sutcliffe, V.: River Flow Forecasting through Conceptual Models. Part I. A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 1970, 10, p. 272 – 290.
- Thornthwaite, C. W., Mather, J. R.: The Water Balance. Publication in Climatology 8. New Jersey: C. W. Thornthwaite & Associates, Centerton, 1955, 104 p.
- Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bouten, W., Sorooshian, S.: A Shuffled Complex Evolution Metropolis Algorithm for Optimization and Uncertainty Assessment of Hydrologic Model Parameters. Water Resources Research, 2003, 39, 8, 1201.
- Wagener, T.: Can We Model the Hydrological Impacts of Environmental Change? Hydrological Processes, 2007, 21, p. 3233 – 3236.
- Wang, Z. M., Batelaan, O., De Smedt, F.: A Distributed Model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa). Physics and Chemistry Earth, 1996, 21, 3, p. 189 – 193.

Mgr. Dušan Kočický, PhD., kocicky@esprit-bs.sk
RNDr. Martin Mareta, PhD., mareta@esprit-bs.sk
ESPRIT, s. r. o., Pletiariska 2, 969 27 Banská Štiavnica