MODELOVÁNÍ HYPODERMICKÉHO ODTOKU

Tomáš Vogel

Hypodermický odtok často vzniká na rozhraní mezi dobře propustnou povrchovou vrstvou půdy a následující méně propustnou půdní vrstvou či horninovým podložím. K tvorbě mělkého nasyceného proudění dochází pouze při vydatných srážkách a má tedy výrazně tranzientní charakter. Odtok může být urychlen přítomností preferenčních cest (např. půdních makropórů). K simulaci proudění ve svahovém segmentu je použita kombinace modelu jednorozměrného vertikálního proměnlivě nasyceného proudění v systému s duální pórovitostí a modelu jednorozměrného nasyceného proudění podél rozhraní mezi půdními vrstvami. Pro vybranou letní sezónu je analyzována shoda simulovaných a měřených odtokových hydrogramů pozorovaných v průběhu významných srážkoodtokových epizod.

Klíčová slova: odtok ze svahu, hypodermický odtok, proudění v proměnlivě nasyceném prostředí, difuzní vlna, kinematická vlna, preferenční proudění, dynamika půdní vody, srážkoodtokové epizody

***Modelling shallow subsurface runoff**. Shallow subsurface runoff usually takes place at the interface of well permeable surface soil layer and less permeable underlying soil or bedrock strata. This type of flow is often encountered in hillslopes of mountain or upland catchments. Normally, it occurs for a short period of time as an immediate response to intense rainfall events. Within the proposed conceptual model, the flow in a hillslope segment can be regarded as superposition of two components: one-dimensional vertical component (combination of variably saturated matrix flow and preferential flow) and one-dimensional downhill component (saturated flow along impervious or semi-pervious soil-bedrock interface). Simulated hillslope runoff is compared with the measured runoff hydrographs observed during major rainfall-runoff episodes of a selected summer season.*

Key words: hillslope runoff, shallow subsurface flow, variably saturated flow, diffusion wave, kinematic wave, preferential flow, soil water dynamics, rainfall-runoff episodes

---

ÚVOD

Exaktní, fyzikálně založený popis proudění ve svahovém segmentu, se všemi přírodními nepravidelnostmi a komplexní mnohoúrovňovou heterogenitou, je s našimi současnými znalostmi prakticky nemožné. Proto se využívají podstatně zjednodušené modelové přístupy a pracovní hypotézy, které vedou k pouze přibližným řešením. Cílem modelování je kvalifikovaná kvantitativní předpověď chování systému (např. v extrémních podmínkách).

Pohyblivost vody, která se zúčastní hypodermického proudění, je určena hydraulickými vlastnostmi pórovitého prostředí nad nepropustným podložím nebo méně propustnou půdní vrstvou. Rychlost proudění může být výrazně zesílena, pokud jsou přítomny spojité preferenční cesty orientované podél svahu. Intenzita proudění do značné míry závisí na gravitačních silách úměrných místnímu sklonu. Avšak, vzhledem k transientnímu charakteru proudění, není zanedbatelný ani vliv tlakových sil, zvláště při vzniku a odeznívání podpovrchové odtokové epizody.

V tomto příspěvku jsou diskutovány dva modely proudění ve svahovém segmentu: (i) dvourozměrný model proudění ve svislém řezu vedeném spádnicí terénu, (ii) zjednodušený model kombinující jednorozměrné vertikální proudění v proměnlivě nasyceném půdním profilu s jednorozměrným nasyceným prouděním po nepropustném nebo málo propustném horninovém podloží nebo rozhraní půdních vrstev (viz obr. 1).

Stručně jsou popsány dva přístupy k modelování jednorozměrného hypodermického odtoku: (i) model difuzní vlny a (ii) model kinematické vlny.

MATERIÁL A METODY

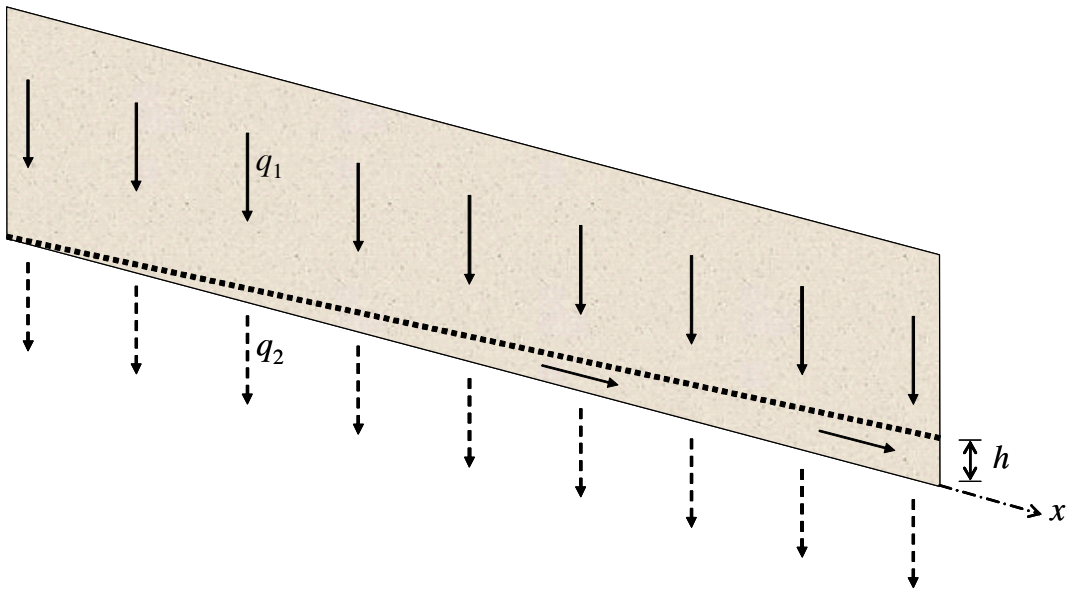
Experimentální lokalita

Ke studiu tvorby podpovrchového odtoku jsou využívána data z experimentálního povodí Uhlířská v Jizerských horách. Výsledky simulací jsou porovnávány s odtokovými hydrogramy pozorovanými na svahové lokalitě Tomšovka.

V povodí Uhlířská jsou dlohodobě monitorovány základní meteorologické a hydrologické veličiny. Povodí spravuje Český hydrometeorologický ústav. Experimentální výzkum zde provádějí také: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M., Stavební fakulta ČVUT, Ústav pro hydrodynamiku AVČR a další instituce.

Plocha povodí je 1.87 km^2, nadmořská výška závěrového profilu 776 m.n.m., průměrná délka svahů 450 m. Půdní profil je mělký a značně heterogenní. Na svazích je převládajícím půdním typem Kambisol na zvětralém žulovém podkladu, ve dně údolí Histosol. V půdě pokrývající svahy povodí Uhlířská byly opakovaně pozorovány projevy preferenčního proudění (Císlerová et al., 2002).

Podpovrchový odtok je měřen nad nejstrmější částí svahu v lokalitě Tomšovka (Šanda et al., 2001). Voda vytékající ze svahu je zachycována v experimentálním příkopu. Sklon svahu nad příkopem je přibližně 14%. Příkop je rozdělěn na dvě samostatné sekce (označené jako A a B) a tři jímací horizonty. Výtok z jednotlivých sekcí a horizontů je měřen odděleně překlopnými průtokoměry. Na svahu jsou monitorovány změny tlaku půdní vody pomocí tenzometrů.



Obr. 1 Proudění ve svahovém segmentu vyvolané přívalovou srážkou. Proudění je rozloženo do vertikální složky (jednrozměrné proudění v proměnlivě nasycené půdě) a složky odvádějící vodu dolů po svahu (jednorozměrné nasycené proudění podél nepropustného nebo polopropustného spodního okraje segmentu). V případě propustného podloží dochází k prosakování vody do hlubších horizontů.

Fig. 1 Flow in a hillslope segment in response to a rainstorm. The flow is decomposed into one-dimensional vertical component (variably saturated soil water movement) and one-dimensional downhill component (saturated flow along the impervious or semipervious lower boundary of the segment). In case of permeable subsoil or bedrock, vertical discharge to deeper horizons occurs.

Model dvourozměrného proudění v proměnlivě nasyceném prostředí

K popisu vertikálního rovinného proudění vody v proměnlivě nasyceném svahovém segmentu je možno použít dvorozměrnou Richardsovu rovnici (např. Freeze & Cherry, 1979):

$$C\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K}(\nabla h + \nabla z)] \quad (1)$$

kde h je tlaková výška půdní vody (m), $\mathbf{K}$ je tenzor hydraulické vodivosti (m/s), C je specifická kapacita (1/m), z je vertikální prostorová souřadnice orientovaná kladně směrem vzhůru (m), t je čas (s). Po zavedení vhodných počátečních a okrajových podmínek můžeme pomocí této řídící rovnice simulovat proudění ve svahovém segmentu a vypočítat tak odtokové odezvy svahu na konkrétní srážkové epizody.

V případě, že je proudění v půdním profilu významně urychlováno díky přítomnosti preferenčních cest (např. vlivem makropórů), můžeme v dvourozměrném modelu napodobit přirozenou variabilitu pórovitého prostředeí prostorovou variabilitou hydraulických vlastností prostředí. Nejjednodušším variantou této metody je použití náhodně nebo deterministicky generovaného pole hydraulických vodivostí. Pomocí tohoto pole se vytvoří v oblasti proudění zóny zvýšené vodivosti, které v modelu zastupují preferenční cesty. Fyzikálně realističtější alternativou je nahrazení jednodoménového popisu proudění dvoudoménovým (Vogel et al., 2000). Proudění pak může být popsáno dvojicí řídících rovnic, zvlášť pro doménu půdní matrice a zvlášť pro doménu preferenčního proudění. Proudění tak probíhá ve dvou paralelních, vzájemně komunikujících doménách. Komunikace je zajištěna pomocí společného přenosového členu v řídících rovnicích proudění.

Detailní simulace dynamiky půdní vody ve svahovém půdním profilu pomocí dvourozměrného modelu klade, bez ohledu na přítomnost či nepřítomnost preferenčního proudění, značné nároky na výpočetní prostředky použité k numerickému řešení řídící rovnice proudění. Pro svahy delší než několik desítek metrů tyto nároky stále ještě přesahují současné možnosti běžných osobních počítačů.

Model difuzní vlny

Teto model je založen na kombinaci jednorozměrného vertikálního proudění s jednorozměrným hypodermickým odtokem. Při dostatečně vydatném dešti voda infiltruje půdním profilem verikálně až k nepropustnému podloží (nebo k hornímu okraji méně propustné půdní vrstvy), kde se postupně vytváří nasycená oblast. V této oblasti voda proudí ve směru určeném lokálním sklonem spodního okraje nasycené oblasti (ten se obvykle příliš neliší od sklonu terénu). Proměnlivě nasycené vertikální proudění je dobře popsáno jednorozměrnou Richardsovou rovnicí, zatímco hypodermický odtok můžeme aproximovat jednorozměrnou rovnicí difuzní vlny.

Kombinací Darcyho zákona s Dupuitovým předpokladem hydrostatického rozdělení tlaku po výšce nasycené oblasti proudění získáme:

$$Q = -Kh\left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{dz}{dx}\right) \quad (2)$$

kde Q je lokální specifický průtok jednotkovou šířkou svahu (m^2/s), h je hloubka hypodermického proudu, tj. vertiální rozsah nasycené oblasti proudění (m), K je efektivní nasycená hydraulická vodivost (m/s), dz/dx je lokální sklon svahu (-).

Rovnici kontinuity pro hypodermické proudění můžeme napsat ve tvaru:

$$\Theta\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = R \quad (3)$$

kde Θ je efektivní pórovitost (m^3/m^3), R je intenzita vertikálního přítoku srážkové vody na jednotkovou šířku a jednotkovou délku svahu (m/s).

Dosazením specifického průtoku do rovnice kontinuity získáme rovnici s jedinou závisle proměnnou *h*:

$$\Theta \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(Kh\left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{dz}{dx} \right) \right) = R \qquad R = q_1 - q_2 \qquad (4)$$

což je rovnice difuzní vlny (Zároveň je zřejmé, že tato rovnice je obdobou jednorozměrné Boussinesqovy rovnice).

Model kinematické vlny

Na model kinematické vlny můžeme nahlížet jako na zvláštní případ obecnějšího modelu difuzní vlny. Přístup založený na principu kinematické vlny je použitelný za předpokladu, že gravitační síly dominují nad silou tlakového gradientu.V takovém případě může být tlakový gradient zanedbán, tj.: $\partial h/\partial x = 0$. Pro hypodermický odtok pak dostáváme:

$$Q = -Kh\frac{dz}{dx} \qquad (5)$$

Tato rovnice zprostředkuje jednoznačný funkční vztah mezi odtokem a hloubkou hypodermického proudu. Funkci $Q(h)$ můžeme využít k náhradě časové derivace h v rovnici kontinuity za časovou derivaci Q:

$$\Theta \frac{dh}{dQ}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = R \qquad (6)$$

tj.:

$$\frac{1}{c}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = R \qquad (7)$$

což je rovnice kinematické vlny. V této rovnici je c rychlost postupu kinematické vlny, často označovaná jako kinematická celerita. V případě hypodermického proudění je celerita definována výrazem:

$$c = \frac{1}{\Theta}\frac{dQ}{dh} = -\frac{K}{\Theta}\frac{dz}{dx} = \frac{K}{\Theta}\sin\alpha \qquad (8)$$

kde α je úhel sklonu svahu. Celerita představuje rychlost postupu libovolné změny proudění, jako je náhlá změna průtoku, dále po proudu. Je zřejmé, že pro hypodermický odtok platí jednoduchý vztah mezi kinematickou celeritou a rychlostí proudění:

$$c = \frac{v}{\Theta} \qquad (9)$$

kde $v = Q/h$ je průměrná rychlost proudění. V jednoduchých případech může být rovnice kinematické vlny řešena analyticky (např. pro konstantní hodnoty K, Θ, α a R). Ve složitějších případech je třeba použít numerické řešení.

Pro velmi krátké svahy může být hypodermický odtok přibližně určen ze vztahu:

$$Q \approx R\,L \tag{10}$$

kde L je přispívající delka svahu (m). Tento vztah platí přesně pro ustálené proudění.

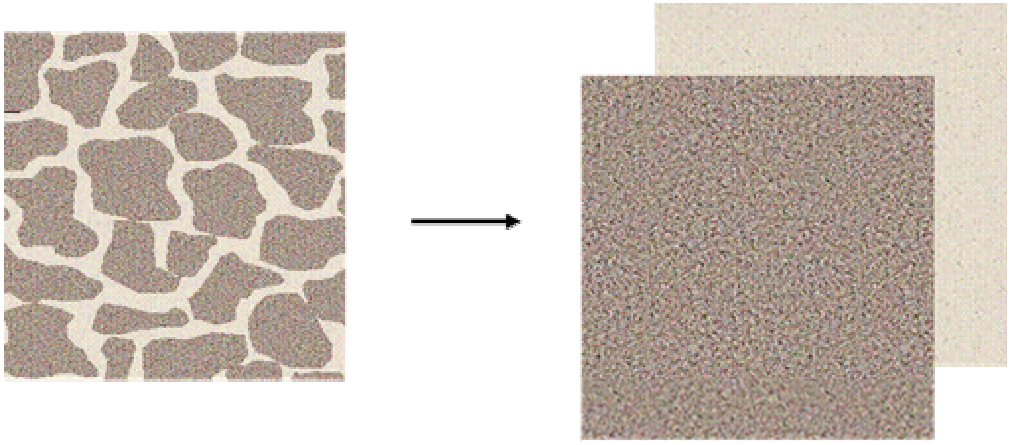
Použití modelu kinematické vlny při modelování podpovrchového odtoku diskutuje např. Beven (2001). Algoritmy pro řešení rovnic difuzní a kinematické vlny jsou zahrnuty do numerického modelu HYPO (Vogel, 2002).

Model preferenčního proudění – princip duálního kontinua

Preferenční proudění může významně urychlit hypodermický odtok. Často je efektivní hydraulická vodivost K, vystupující v rovnici difuzní vlny, určena právě vodivostí sítě preferenčních cest. Příspěvek vodivosti půdní matrice bývá menší nebo dokonce zanedbatelný. Preferenční cesty urychlují také vertikální pohyb vody v půdním profilu, reprezentovaný v rovnici difuzní vlny intenzitou vertikálního přítoku R.

Intenzitu přítoku R můžeme určit pomocí modelu vertikálního pohybu vody v proměnlivě nasyceném půdním profilu, tj. numerickým řešením jednorozměrné Richardsovy rovnice. Je-li podstatná část přítoku způsobena preferenčním prouděním, musí být tato řídící rovnice doplněna ještě rovnicí popisující proudění v síti preferenčních cest.

Poměrně jednoduchý model paralelního proudění vody v půdní matrici a v síti preferenčních cest vznikne aplikací metody duálního kontinua, která bývá také označována jako metoda duální pórovitosti (Gerke & van Genuchten, 1993) nebo duální propustnosti.



Obr. 2 Princip duálního kontinua – vnitřně strukturované pórovité prostředí je nahrazeno dvěma doménami proudění: doménou půdní matrice a doménou preferenčního proudění.

Fig. 2 Dual-continuum approach – internally structured porous medium is decomposed into two flow domains: the matrix domain and the preferential flow domain.

Princip duálního kontinua vychází z představy, že proudění vody probíhá ve dvou paralelních doménách: doméně půdní matrice a doméně preferenčního proudění (viz obr. 2). Proudění v každé z obou domén je popsáno Richardsovou rovnicí. Obě rovnice jsou vzájemně propojeny prostřednictvím přenosového členu, který umožňuje dynamickou výměnu vody mezi doménou preferenčního proudění a půdní matricí. V případě jednorozměrného proudění nabývá dvojice řídících rovnic následujícího tvaru:

$$w_f C_f \frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(w_f K_f \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + 1 \right) \right) - w_f S_f - \alpha_w (h_f - h_m)$$
$$w_m C_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(w_m K_m \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right) - w_m S_m + \alpha_w (h_f - h_m) \quad (11)$$

kde m je index označující doménu půdní matrice, f je index označující doménu preferenčního proudění, h je tlaková výška (m), K je nenasycená hydraulická vodivost (m/s), C je diferenciální kapacita půdní vody (1/m), S je lokální intenzita kořenové extrakce (1/s), α_w je přenosový koeficient (1/s/m), w_m a w_f jsou objemové podíly příslušných domén.

K simulaci jednorozměrného proudění v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí je použit model S1D DUAL. Tento model je rozšířenou verzí modelu HYDRUS 5 (Vogel et al., 1996). Model S1D DUAL umožňuje výpočet proudění a transportu látek v pórovitém prostředí s preferenčními cestami.

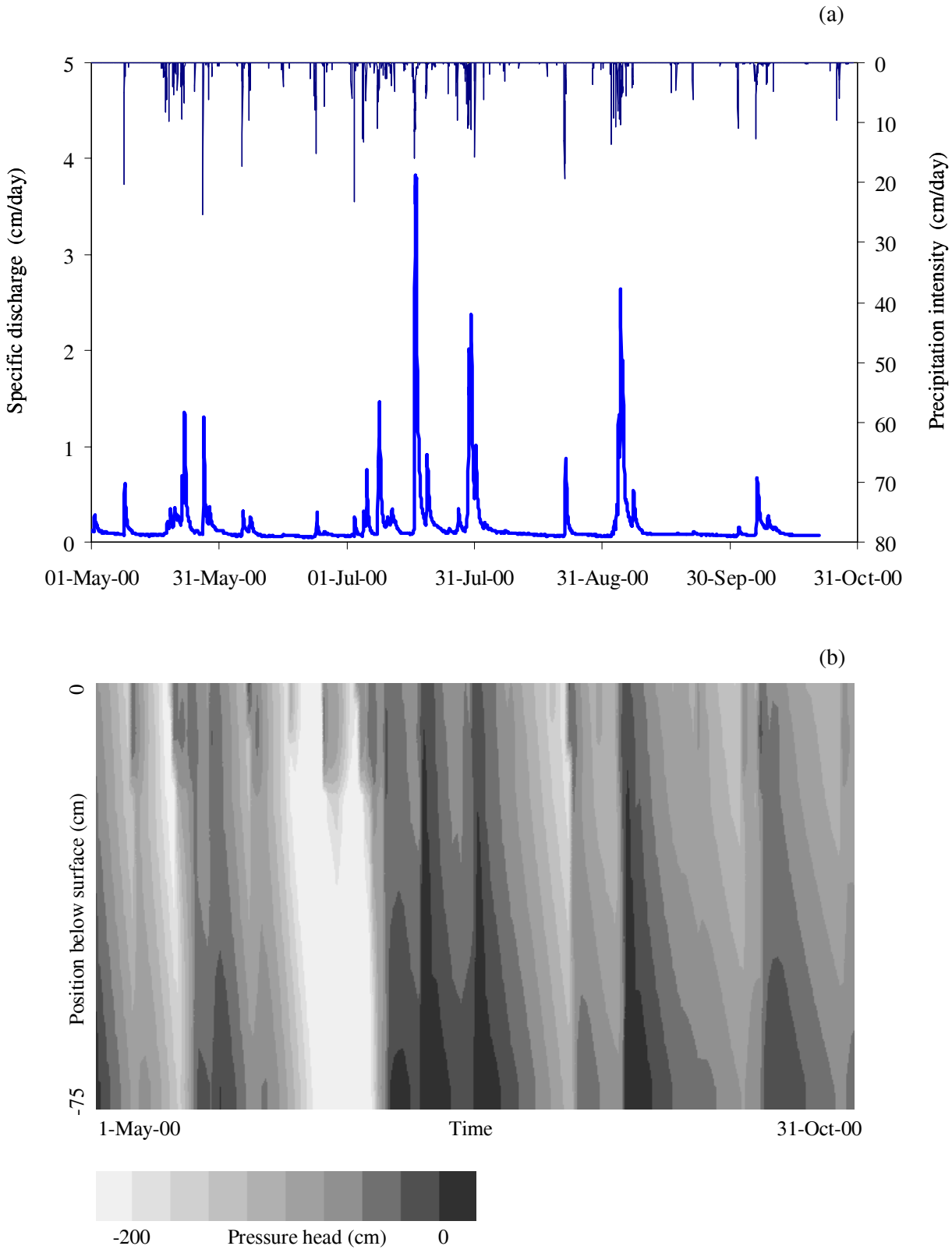
Simulace hypodermického proudění

Simulace hypodermického odtoku pomocí modelu difuzní nebo kinematické vlny probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se simuluje vertikální proudění v půdnm profilu pomocí modelu S1D DUAL. Předpokládá se, že voda vytékající ze spodního okraje domény půdní matrice prosakuje dále do hlubších horizontů (q_2 v obr. 1), zatímco výtok z domény preferenčního proudění přispívá k hypodermickému odtoku (q_1 - q_2 v obr. 1). Ve druhém kroku se simuluje vlastní hypodermický odtok pomocí modelu HYPO.

VÝSLEDKY A DISKUSE

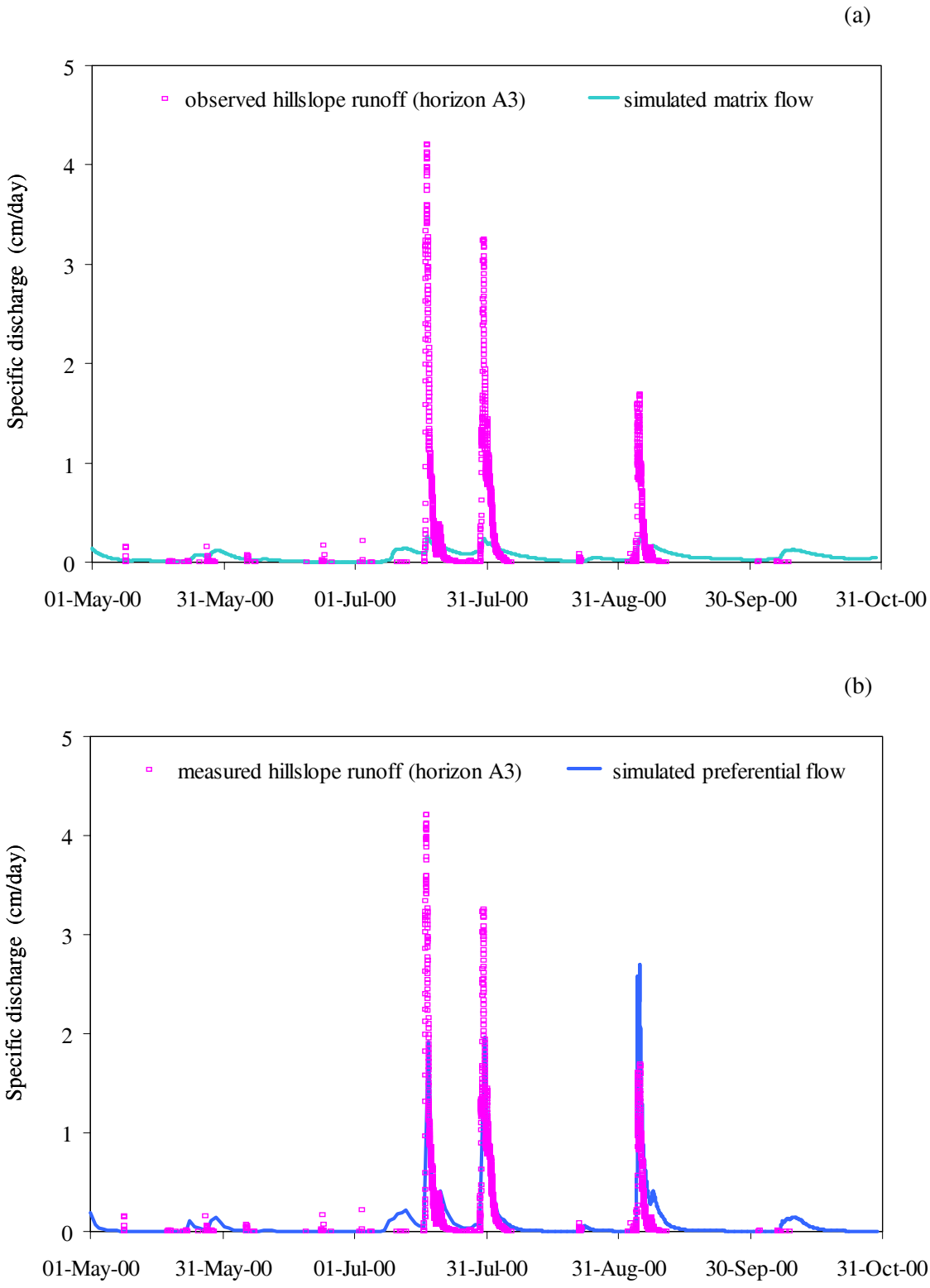
Popsaný model proudění je použit k simulaci tvorby podpovrchového odtoku na povodí Uhlířská. Srovnání výsledků simulací s měřenými hydrogramy je provedeno pro letní sezónu roku 2000. Obr. 3b ukazuje simulovanou odezvu půdního profilu vyvolanou sérií srážkoodtokovýchvých událostí (viz obr. 3a). Časoprostorové rozdělení tlaku půdní vody ukazuje zřetelně ohraničené epizody nasyceného podpovrchového odtoku. Simulovaný vývoj tlaku se vcelku dobře shoduje s pozorovaným průběhem tlaků zaznamenaným tenzometry umístěnými v blízkosti experimentálního příkopu (srovnání zde není prezentováno).

V obr. 4 jsou porovnávány simulované výtoky z půdní matrice a z domény preferenčního proudění s měřenými přítoky do experimentálního příkopu. Přítok do příkopu v litrech za časovou jednotku je převeden na specifický přítok v centimetrech za časovou jednotku. Při převodu se předpokládalo rovnoměrné rozdělení přítoku podél jímací stěny příkopu a přispívající délka svahu nad příkopem byla odhadnuta na 25 m. Z obrázku je zřejmé, že reakci půdního profilu na srážky nelze vysvětlit na základě simulace proudění v samotné půdní matrici bez uvážení preferenčních cest. Přiměřené shody s měřením je dosaženo teprve přidáním výtoku z domény preferenčního proudění. Zbývající rozdíly mohou být vysvětleny především nedostatkem informací o hydraulických vlastnostech sítě preferenčních cest a její značnou prostorovou variabilitou.



Obr. 3 Dynamika půdní vody v povodí Uhlířská: (a) pozorované srážky a odtokový hydrogram v závěrovém profilu povodí, (b) simulovaný časoprostorový vývoj tlaku půdní vody.

Fig. 3 Soil water dynamics in Uhlířská catchment: (a) observed precipitation and streamflow hydrograph at the catchment outlet, (b) simulated space-time development of soil water pressure.



Obr. 4 Porovnání pozorovaných a simulovaných výtoků ze svahu: (a) výtok z půdní matrice, (b) výtok z domény preferenčního proudění.

Fig. 4 Comparison of observed and simulated hillslope discharges: (a) soil matrix discharge, (b) discharge from preferential flow domain.

ZÁVĚR

Byl vyvinut zjednodušený model hypodermického odtoku ze svahového segmentu. Model umožňuje simulovat mechanismus tvorby podpovrchového odtoku a bere v úvahu urychlující účinek preferenčních cest. Model byl testován na reálných datech. Výsledky simulací jsou porovnávány s pozorovanými hydrogramy podpovrchového odtoku. Srovnání potvrzuje zásadní význam preferenčního proudění při tvorbě podpovrchového odtoku v dané lokalitě. Přes poměrně významné rozdíly mezi simulovanými a měřenými průběhy odtoku (rozdíly jsou hlavně ve velikosti kulminačních odtoků) můžeme konstatovat, že model v mnoha ohledech úspěšne napodobuje chování reálného systému.

Poděkování

Výzkum je financován z prostředků Grantové agentury ČR (č. grantu: 205/05/2312) a institucionální podpory výzkumných záměrů FSv ČVUT poskytované Ministrstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR (č. VZ: MSM 6840770002).

Literatura

Beven, K. (2001): Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, John Wiley, Chichester.

Císlerová, M., T. Vogel, J. Votrubova, A. Robovska (2002): Searching Below Thresholds: Tracing the Origins of Preferential Flow Within Undisturbed Soil Samples, 265-274, Geophysical Monograph Series Volume 129, Water, Mass and Energy Transfer in the Biosfere, Edited by P.A.C. Raats, D.E. Smiles, and A. Warrick, AGU, Washington DC.

Freeze, R. A., and J.A. Cherry (1979): Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J..

Gerke H. H. and van Genuchten, M. Th. (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. Water Resour. Res., 29(2), 305–319, AGU.

Šanda, M., P. Tachecí, A. Kulasová, (2001): Zajištění provozu tenzometrů, sběrných příkopů a lyzimetrů v experimentálních povodích, Progeo s.r.o., VÚV T.G.M., ČHMÚ, Výzkumná zpráva, Praha.

Vogel, T., Huang, K., Zhang, R. and van Genuchten, M.Th., (1996): The HYDRUS code for simulating One-Dimensional Water Flow, Solute Transport, and Heat Movement in Variably-Saturated Media, Version 5.0, Research Report No. 140, U.S. Salinity Lab., ARS, USDA, Riverside, CA.

Vogel, T, Gerke, H. H., Zhang, R. and van Genuchten, M. Th. (2000): Modeling flow and transport in a two-dimensional dual-permeability system with spatially variable hydraulic properties, J. Hydrol., 238, 78-89, Elsevier.

Vogel, T. (2002): One-dimensional saturated subsurface flow code HYPO (unpublished software documentation).

Autor

Tomáš Vogel, Fakulta stavební ČVUT, Katedra hydrauliky a hydrologie, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, vogel@fsv.cvut.cz.