

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ MODELU BILAN METODOU SCDE

Petr Máca, Adam Vizina, Stanislav Horáček

Klíčová slova

hydrologický model – globální optimalizace – diferenciální evoluce

Souhrn

Algoritmus hydrologického konceptuálního modelu BILAN byl rozšířen o nově vytvořený globální optimalizační algoritmus SCDE. SCDE je stochastický optimalizační algoritmus, který je založen na dvou principech: diferenciální evoluci a algoritmu promíchávání populací. SCDE byl porovnán se stávajícím algoritmem modelu BILAN založeným na binárním třídění. Výsledky tří typů případových studií založených na měsíčních datech 234 povodí ukazují na robustnost algoritmu SCDE. Tři varianty algoritmu SCDE byly v 96 % analyzovaných povodí úspěšnější než stávající algoritmus binárního třídění. Optimalizační algoritmus modelu SCDE nově umožňuje získat odhad maximálně věrohodných parametrů modelu BILAN.

Úvod

Při zjišťování optimálních hodnot parametrů hydrologického (a obecně matematického) modelu se uplatňují nejrůznější algoritmy, jejichž úkolem je nalezení optima ve stanoveném parametrickém prostoru kritériální funkce (Duan et al., 1993; Vrugt et al., 2009).

Podle způsobu prohledávání parametrického prostoru je možné rozlišit dvě skupiny algoritmů: lokální, které zpravidla za pomoci gradientu kritériální funkce postupují z výchozích hodnot parametrů, a globální, které při hledání optima zohledňují celý parametrický prostor. Lokální algoritmy bývají výpočetně méně náročné, a tedy schopné optimum rychle nalézt, v případě složitějšího průběhu objektivní funkce (což často bývá případ hydrologických modelů) se však může jednat pouze o optimum lokální. V tom případě je výhodou robustnost globálních algoritmů, které zjistí globální optimum a navíc mohou poskytnout určitou informaci o ekvifinalitě, resp. nejistotě parametrů (Duan et al., 1993; Storn a Price, 1997; Vrugt et al., 2009).

Cílem práce bylo začlenění globálního optimalizačního algoritmu do konceptuálního hydrologického modelu BILAN (Tallaksen a van Lanen, 2004; Horáček et al., 2009) a porovnání jeho kalibračních schopností s výsledky kalibrace s původně implementovaným algoritmem, který je založen na sledování gradientu kritériální funkce.

Metody

Optimalizační algoritmus SCDE

Pro optimalizaci parametrů modelu BILAN byl zvolen globální algoritmus SCDE – Shuffled Complex Differential Evolution. Metoda je odvozena z algoritmu publikovaného a testovaného v rámci studií (Vrugt et al., 2009; Mariani et al., 2011). Použitý algoritmus pracuje s populací modelů, které prostřednictvím vzájemné interakce prohledávají parametrický prostor a nacházejí v něm optimální hodnoty parametrů.

Algoritmus SCDE spojuje evoluční metodu diferenciální evoluce (Storn a Price, 1997) s algoritmem promíchávání, který tvoří podstatnou část známého široce používaného algoritmu SCE-UA (Duan et al., 1993).

Populace modelů je složena z jedinců. Každý z nich je reprezentován jednou sadou parametrů a hodnotou kritériální funkce. Pro tyto jedince je iterativně hledána optimální hodnota kritériální funkce.

Promíchávání spočívá v rozdělení populace do komplexů, ve kterých je následně aplikována vybraná varianta diferenciální evoluce. Komplexy jsou tvořeny tak, aby obsahovaly relativně podobné modely podle rozdělení hodnot kritériální funkce a zároveň bylo možné periodicky zaměňovat jedince mezi komplexy.

Použitý algoritmus se skládá z následujících kroků:

1. Populace modelů (sad parametrů) je inicializována pomocí metody latinských čtverců, která efektivně pokrývá parametrický prostor ohraničený dolními a horními mezemi parametrů.
2. Modely jsou seříděny podle hodnot zvolené kritériální funkce.
3. Z populace modelů jsou vytvořeny komplexy, a to tak, aby byly v komplexu rovnoměrně zastoupeny dobré i špatné modely z hlediska kritériální funkce (model s nejlepší hodnotou je přiřazen k prvnímu komplexu, s druhou nejlepší ke druhému atd., po přiřazení k poslednímu komplexu se znovu postupuje od prvního).
4. Jednotlivé komplexy jsou optimalizovány metodou diferenciální evoluce (viz dále) během zvoleného počtu generací (iterací).
5. Optimalizované komplexy jsou spojeny do jedné populace.
6. Po překročení zadaného maximálního počtu iterací se algoritmus zastaví, jinak pokračuje krokem 2.

Diferenciální evoluce obsažená v kroku 4 se skládá ze tří hlavních operací, které jsou aplikovány na modelech v jednotlivých komplexech. Jedná se o mutaci, křížení a výběr.

Při mutaci jsou spočítány změněné hodnoty parametrů modelu mp , a to na základě parametrů náhodně zvoleného modelu v rámci komplexu p_i (kde $i = 1, \dots, 5$) a parametrů nejlepšího modelu v populaci p_b (v závislosti na variantě algoritmu):

(varianta BESTONEBIN) (1)

(varianta CURBESTBIN) (2)

(varianta RANDTWOBIN) (3)

kde F a K jsou parametry algoritmu, jejichž hodnoty se pohybují mezi 0,3 a 1.

Ke křížení dochází s pravděpodobností danou parametrem algoritmu CR . Při křížení je parametr změněný mutací pm přiřazen do modelu pro následující generaci. V algoritmu SCDE je použito binomické křížení u všech tří variant SCDE (Zaharie, 2009).

Volitelně lze určit, že při získání hodnot mimo parametrický prostor budou použity původní rodičovské hodnoty parametrů.

Při výběru je zajištěno, že do další generace budou přiřazeny pouze modely, které zlepšují hodnotu kritériální funkce. V opačném případě budou zachovány původní hodnoty parametrů.

Optimalizační algoritmus má volby, ve kterých se nastavuje počet komplexů a počet jedinců v komplexu, počet generací pro evoluci komplexu, celkový počet promíchávání, varianta diferenciální evoluce a parametry křížení CR a mutace F a K . Čím je komplex větší a čím je použito více komplexů, tím se parametrický prostor prohledává detailněji a roste pravděpodobnost nalezení globálního optima, ale zvyšuje se výpočetní náročnost a celková doba výpočtu.

Jelikož se jedná o stochastický optimalizační algoritmus, je umožněno hledání optimálního řešení pomocí opakovaných výpočtů

(ensembly). Následně lze stanovit rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých parametrů modelu BILAN a dále stanovit odhad maximálně věrohodného modelu určeného optimální hodnotou použité kritériální funkce.

Algorismus byl napsán v jazyce C++ a je součástí současné verze kódu hydrologického modelu BILAN, který je dostupný také jako balík pro prostředí R (R Development Core Team, 2012).

Výsledky

Nově implementované algoritmy diferenciální evoluce s promíchávacím algoritmem byly testovány na 234 povodích pro data celkového odtoku v měsíčním kroku. Globální optimalizační algoritmus byl porovnán v následujících úlohách:

- SCDE vs. lokální optimalizace při stejných mezích parametrů a se stejnou kritériální funkcí současnou metodou modelu BILAN založenou na binárním třídění,
- SCDE ve výchozích mezích parametrů vs. expertní optimalizace doplněná lokálním optimalizačním algoritmem s expertně měněnými mezemi parametrů,
- analýza ensemblové optimalizace.

V obou případech byl nově vyvinutý algoritmus porovnán se stávajícím lokálním optimalizačním algoritmem založeným na binárním třídění, který je v modelu BILAN standardně využíván.

Srovnání optimalizace SCDE s lokální optimalizací při stejných mezích parametrů

U lokálního algoritmu byly použity výchozí hodnoty parametrů, které jsou standardně na základě dlouhodobého využívání nastaveny programem. Jako optimalizační funkce byl zvolen Nashův-Sutcliffův koeficient determinace (dále jen NS). Z hlediska časové náročnosti byly obě optimalizační metody srovnatelné.

Pro výpočet bylo použito následující nastavení algoritmu SCDE – počet komplexů: 6, počet modelů v jednom komplexu: 20, počet promíchávání: 10, počet generací v jednom komplexu: 10, CR: 0,95, F: 0,95 a K: 0,85.

Stávající lokální algoritmus byl nastaven na výchozí hodnoty – počet bisekcí v jedné iteraci: 30, maximální počet iterací: 500, parametr pro první a druhou derivaci parametrů: 0,8 a počáteční druhá derivace parametru: 0,1.

Porovnání bylo měřeno diferencemi mezi NS získaným optimalizačním postupem SCDE a stávajícím lokálním algoritmem implementovaným v současné variantě modelu BILAN. Výsledky souhrnně ukazuje obr. 1.

Kladné difference ukazují ta povodí, u kterých byl nově implementovaný algoritmus úspěšnější než ten původní. V prvních dvou variantách SCDE-BESTONEBIN a SCDE-CURBESTTBIN to bylo u 97 % povodí, u varianty SCDE-RANDTWOBIN byl optimalizační algoritmus úspěšnější u 96 % vyhodnocovaných povodí.

Ve 25 % povodí byly difference větší než 0,63 u prvních dvou typů globálních optimalizačních strategií, u poslední SCDE-RANDTOBIN byl rozdíl roven 0,58. Medián diferencí mezi oběma algoritmy se pohyboval okolo hodnoty 0,12, aritmetický průměr kolem 0,77.

U 60 povodí první a druhá varianta SCDE dosáhly kladných hodnot koeficientu determinace, zatímco stávající lokální algoritmus poskytl

parametry vedoucí ke koeficientu determinace menšímu než nula. Pro třetí variantu SCDE tato skutečnost nastala u 57 povodí.

Uvedené výsledky byly dosaženy bez ensemblové optimalizace, pouze jedním spuštěním optimalizačního postupu u každého povodí. Při porovnání úspěšnosti optimalizačního postupu byly srovnány hodnoty modelované s optimalizovanými parametry s naivním modelem představovaným aritmetickým průměrem dat. Metody SCDE-BESTONEBIN a SCDE-CURBESTTBIN našly lepší model než aritmetický průměr u 228 povodí, metoda SCDE-RANDTOBIN byla úspěšnější u 225 povodí. Stávající lokální metoda byla úspěšnější u 168 povodí.

Srovnání výsledků optimalizace SCDE s výsledky expertní optimalizace

Výsledky variant globálních optimalizačních metod SCDE byly porovnány s výsledky expertní optimalizace, která byla provedena na datech vyhodnocovaných povodí. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny na obr. 2.

Expertní optimalizace (první krabicový graf na obr. 2) byla provedena nejen s použitím stávajícího lokálního optimalizačního algoritmu, ale byl kladen důraz také na znalost povodí. U vybraných povodí nebyl použit koeficient determinace jako hlavní optimalizační kritérium, ale byla zohledněna informace o základním odtoku. V rámci expertní kalibrace byly také škálovány intervaly parametrů a iterativně měněno nastavení lokálního optimalizačního algoritmu. Tento postup je běžně využíván při aplikaci modelu BILAN v různých hydrologických analýzách.

Nastavení parametrů variant globálního optimalizačního algoritmu bylo shodné s použitým nastavením při výpočtu v předchozí kapitole.

Medián NS souboru povodí variant globální optimalizace se pohyboval kolem hodnoty 0,61, zatímco při expertní optimalizaci byl roven 0,49. Medián výsledků globálních optimalizací byl srovnatelný s třetím kvantilem expertních optimalizací (roven 0,60). Aritmetický průměr NS hodnot souboru povodí získaný globální optimalizací byl v intervalu 0,54–0,57, zatímco aritmetický průměr NS z expertní optimalizace je v rámci souboru vyhodnocovaných povodí 0,38.

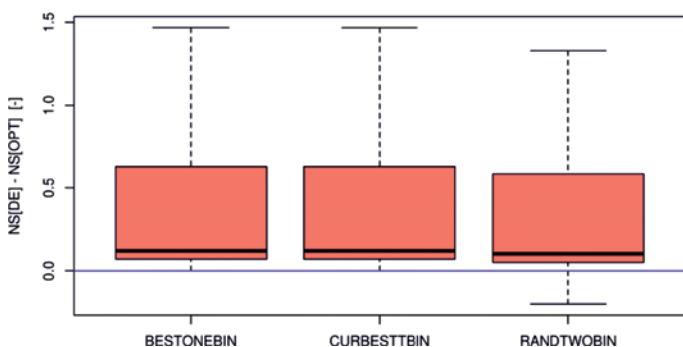
Největší rozdíl mediánů mezi variantou SCDE a expertní kalibrací je roven 0,13 u varianty SCDE-CURBESTTBIN, následován SCDE-BESTONEBIN a nejnižší hodnota rozdílu u varianty RANDTOBIN je rovna 0,11. 25% percentil NS globálních optimalizací se nachází v intervalu 0,5–0,52, pro expertní optimalizace je roven hodnotě 0,31.

Nejvyšší hodnoty NS 0,80 bylo dosaženo variantami BESTONEBIN a CURBESTTBIN na povodí s databázovým číslem 353000 (Břežná, 130 km²). U expertní kalibrace byla pro toto povodí dosažena hodnota 0,73 a u varianty RANDTOBIN 0,78.

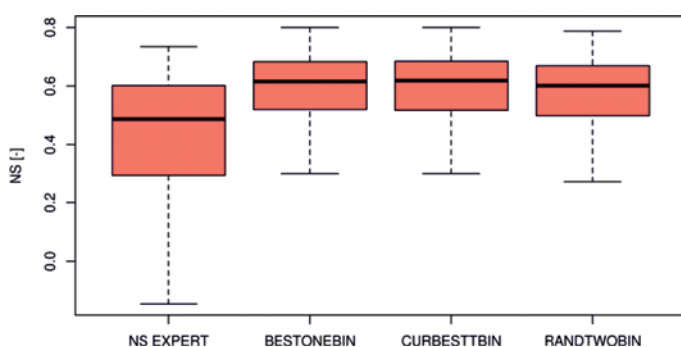
Korelační koeficient mezi NS expertních optimalizací a globálních variant SCDE se nachází v blízkosti hodnoty 0,55. Varianty SCDE jsou navzájem velmi korelované (0,98–0,99).

Srovnání ensemblové globální optimalizace s expertní optimalizací

Nově navržený globální algoritmus SCDE je stochastickým algoritmem a lze jej použít pro stanovení odhadu rozdělení pravděpodob-



Obr. 1. Difference Nashova-Sutcliffova koeficientu (diferenciální evoluce označena DE, lokální vyhledávací algoritmus označen OPT)
Fig. 1. Differences of Nash-Sutcliff's coefficients (differential evolution is DE and finding local algorithms is OPT)



Obr. 2. Srovnání Nashova-Sutcliffova koeficientu expertní optimalizace a variant SCDE
Fig. 2. Comparison of Nash-Sutcliff coefficient for expert optimization and SCDE's variations

nosti parametrů hydrologického modelu BILAN. Z tohoto důvodu je optimalizační postup navržen tak, aby umožnil vícenásobné opakované provedení optimalizačního výpočtu a získání ensamble. V rámci každého dílčího výpočtu jsou použity stejné rozsahy parametrů a vždy jiné náhodně volené výchozí populace modelů. Výchozí modely jsou inicializovány metodou latinských čtverců.

Pro každé z 234 povodí byla provedena ensemblová optimalizace, která obsahovala 100 různých inicializací výchozích populací. Ze souboru 100 optimalizací byl vybrán nejlepší model podle NS, který je řadou autorů považován jako odhad maximálně věrohodného modelu. Dále byl soubor věrohodných modelů porovnán s výsledky expertní optimalizace. Porovnání kvantilů NS je zobrazeno na obr. 3.

Všechny varianty SCDE-BESTONEBIN a CURBESTTBIN byly úspěšnější na 231 povodích, varianta RANDTOBIN byla úspěšnější na 229 povodích. Průměrná absolutní odchylka koeficientů determinace mezi expertní optimalizací je rovna 0,20 pro varianty CURBESTTBIN a RANDTOBIN a 0,19 pro variantu BESTONEBIN. 25% kvantil NS u globálních variant (0,51–0,52) byl vyšší než medián NS souboru povodí s parametry optimalizovanými expertní optimalizací (0,49).

Jako příklad výsledků ensemblové simulace jsou uvedeny výsledky výpočtu odtoku povodí Loučky (databázové číslo 447000). Výsledné hydrogramy odtoku jsou uvedeny na obr. 4 až 6, vybrané histogramy optimálních hodnot parametru Spa, Grd a Dgm jsou uvedeny na obr. 7 až 9.

Závěr

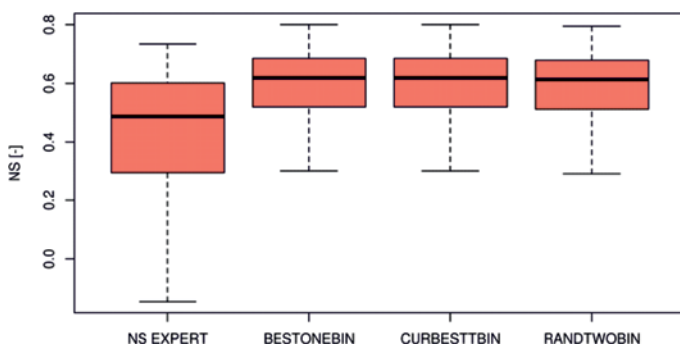
Stávající algoritmus modelu BILAN byl nově rozšířen o metodu globální optimalizace SCDE, jež spojuje algoritmus promíchání dílčích komplexů, na které je rozdělena základní populace modelů, a metodu diferenciální evoluce. Globální optimalizační algoritmus byl testován na 234 povodích v rámci predikce prvků hydrologické bilance v měsíčním kroku. Algoritmus SCDE prokázal výhody globální optimalizace a v porovnání s výsledky dosaženými expertní optimalizací také svoji robustnost. Implementovaný algoritmus SCDE výrazně přispívá ke studiu parametrické nejistoty modelu BILAN a poskytuje odhad rozdělení pravděpodobnosti optimálních parametrů, které splňuje přednastavené požadavky na hodnoty objektivní funkce. Součástí modelu BILAN je nově ensemblová optimalizace metodou SCDE, která mimo jiné poskytuje kvalifikovaný odhad parametrů maximálně věrohodného modelu.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu TA01020508 Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn, který je financován Technologickou agenturou České republiky.

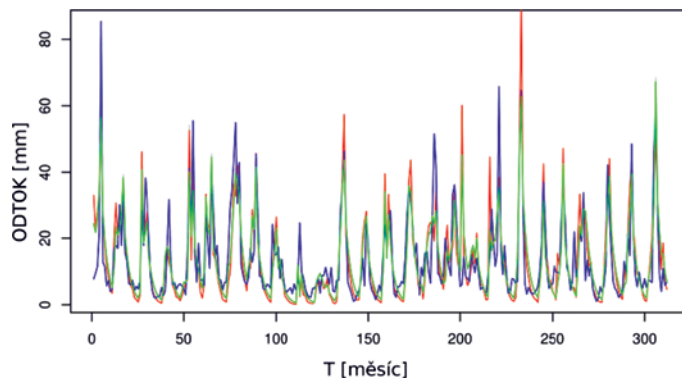
Literatura

- Duan, Q., Gupta, V., and Sorooshian, S. (1993) Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76 (3), p. 501–521.
- Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L. a Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance – BILAN. *VTEI*, 51, mimoř. č. I, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2009.



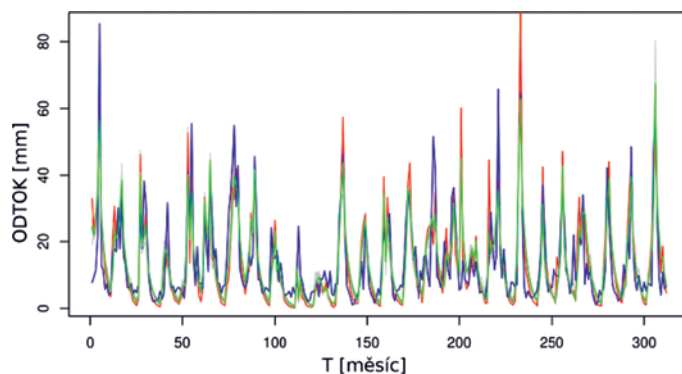
Obr. 3. Porovnání Nashova-Sutcliffova koeficientu optimalizačních postupů

Fig. 3. Comparison of Nash-Sutcliff coefficient for optimization procedures



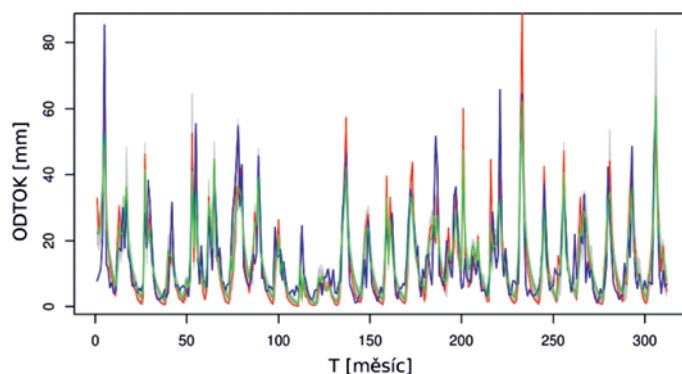
Obr. 4. Povodí Loučky (DBC 447000), BESTONEBIN simulovaný odtok: červená barva expertní optimalizace, zelená barva maximálně věrohodný model, modrá barva pozorovaná data, šedá data ensemble 100 simulací

Fig. 4. Catchment area Loučky (DBC 4470), BESTONEBIN simulated runoff, expert optimization – red color, maximum likelihood model – green color, observed data – blue color and grey color for ensemble of 100 simulations



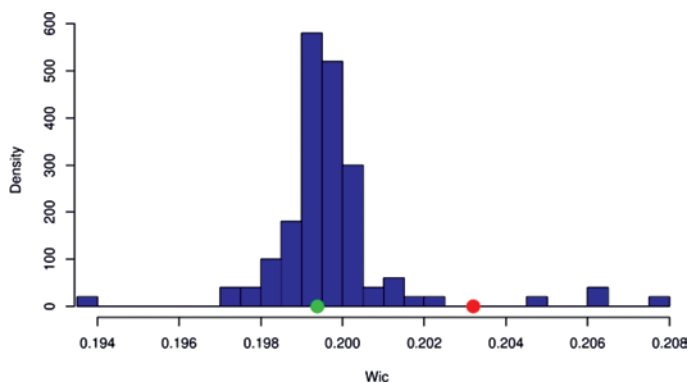
Obr. 5. Povodí Loučky (DBC 447000), CURBESTTBIN simulovaný odtok: červená barva expertní optimalizace, zelená barva maximálně věrohodný model, modrá barva pozorovaná data, šedá data ensemble 100 simulací

Fig. 5. Catchment area Loučky (DBC 4470), CURBESTTBIN simulated runoff, expert optimization – red color, maximum likelihood model – green color, observed data – blue color and grey color for ensemble of 100 simulations



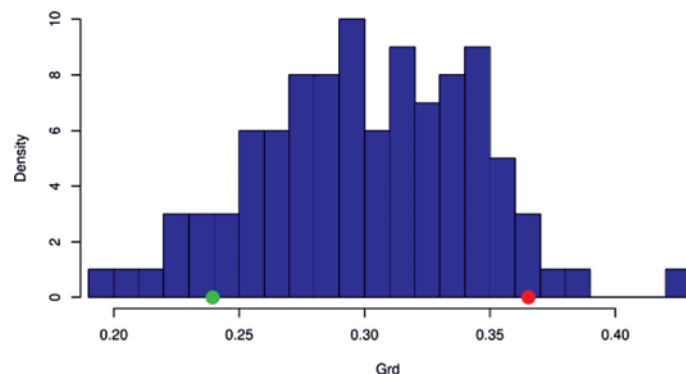
Obr. 6. Povodí Loučky (DBC 447000), RANDTWOBIN simulovaný odtok: červená barva expertní optimalizace, zelená barva maximálně věrohodný model, modrá barva pozorovaná data, šedá data ensemble 100 simulací

Fig. 6. Catchment area Loučky (DBC 4470), RANDTWOBIN simulated runoff, expert optimization – red color, maximum likelihood model – green color, observed data – blue color and grey color for ensemble of 100 simulations



Obr. 7. BESTONEBIN histogram parametrů WIC povodí 447000: červený bod expertní optimalizace, zelený bod maximálně věrohodný model

Fig. 7. Histogram of parameters WIC for catchment area 447000 and BESTONEBIN optimization, expert optimization – red point and maximum likelihood model – green point



Obr. 8. CURBESTTBIN histogram parametrů GRD povodí 447000: červený bod expertní optimalizace, zelený bod maximálně věrohodný model

Fig. 8. Histogram of parameters GRD for catchment area 447000 and CURBESTTBIN optimization, expert optimization – red point and maximum likelihood model – green point

- Mariani, V.C., Luvizotto, L.G.J., Guerra, F.A., and Coelho, L.D. (2011) A hybrid shuffled complex evolution approach based on differential evolution for unconstrained optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 217 (12), p. 5822–5829.
- R Development Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.r-project.org>.
- Storn, R. and Price, K. (1997) Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11 (4), p. 341–359.
- Tallaksen, L.M. and van Lanen, H.A.J. (eds) (2004) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam.
- Vrugt, J.A., ter Braak, C.J.F., Diks, C.G.H., Robinson, B.A., Hyman, J.M., and Higdon, D. (2009) Accelerating Markov Chain Monte Carlo Simulation by Differential Evolution with Self-Adaptive Randomized Subspace Sampling. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 10 (3), p. 273–290.
- Zaharie, D. (2009) Influence of crossover on the behavior of Differential Evolution Algorithms. *Applied Soft Computing*, 9 (3), p. 1126–1138.

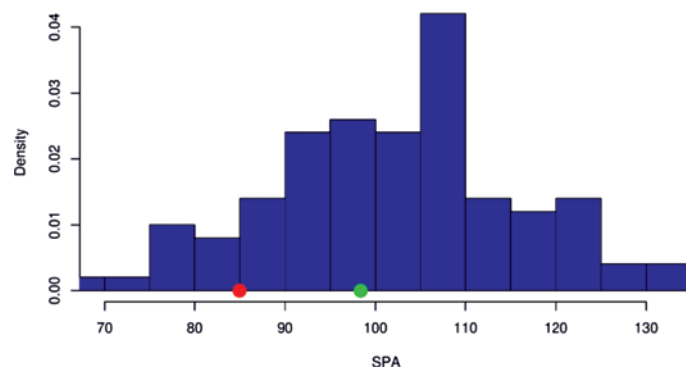
**Ing. Petr Máca, Ph.D.², Ing. Adam Vizina^{1,2},
Ing. Stanislav Horáček, Ph.D.^{1,2}**

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
²Fakulta životního prostředí,
Česká zemědělská univerzita v Praze
maca@fzp.czu.cz, adam_vizina@vuv.cz,
stanislav_horacek@vuv.cz
Příspěvek prošel lektorským řízením.

The parameter optimisation of hydrological model BILAN using the SCDE method (Máca, P.; Vizina, A.; Horáček, S.)

Key words

hydrological model – global optimization – differential evolution



Obr. 9. RANDTWOBIN histogram parametrů SPA povodí 447000: červený bod expertní optimalizace, zelený bod maximálně věrohodný model

Fig. 9. Histogram of parameters SPA for catchment area 447000 and RANDTWOBIN optimization, expert optimization – red point and maximum likelihood model – green point

The current algorithm of hydrological conceptual model BILAN was extended using the newly developed SCDE global optimization algorithm. The SCDE is a stochastic algorithm and combines together two principles: the differential evolution and shuffling the complexes of population. The SCDE results were compared with current optimization algorithm based on binary search. The results of three types of case studies performed on monthly data obtained from 234 basin in the Czech Republic show the robustness of SCDE. The three variants of SCDE were capable to outperform the current BILAN's binary optimization scheme on 96% of analyzed basins according Nash-Sutcliffe values. Newly the BILAN optimization algorithm SCDE is capable to provide the estimates of maximum likelihood model.

Souhrn

Výpar z volné vodní hladiny je jedním z důležitých činitelů ovlivňujících celkovou vodní bilanci povodí. Vzhledem ke komplikovanému přímému měření je zjišťován ze vzorců, které jako vstupní data vyžadují dostupné měřené meteorologické veličiny. Příspěvek vyhodnocuje výparoměrná a meteorologická data změřená ve výparoměrné stanici Hlasivo u Tábora v sezonách květen až říjen v letech 1957 až 2012. V první části příspěvku jsou popsány výsledky statistických analýz vybraných meteorologických a výparoměrných dat, které potvrdily statisticky významný stoupající trend v hodnotách výparu. V druhé části příspěvku je popsán způsob odvození regresních vztahů pro výpočet výparu při využití různých meteorologických veličin. Na základě nově odvozených vztahů byl modelován výpar a dosažené výsledky byly vzájemně porovnány. Nejlepších výsledků bylo dosaženo

**ODVOZENÍ REGRESNÍCH VZTAHŮ
PRO VÝPOČET VÝPARU Z VOLNÉ
HLADINY A IDENTIFIKACE TRENDŮ
VE VÝVOJI MĚŘENÝCH VELIČIN
VE VÝPAROMĚRNÉ STANICI HLASIVO**

Adam Beran, Adam Vizina

Klíčová slova

výpar – srovnávací výparoměr – výparoměrná stanice Hlasivo – statistická analýza trendů – odvození regresních vztahů – program CTPA

při použití vzorce využívajícího pro výpočet dvě měřené veličiny, a sice teplotu vody (resp. teplotu vzduchu) a rychlost větru.

Úvod

Výparoměrná stanice v Hlasivu u Tábora byla vybudována v roce 1957 v místech původní výzkumné meteorologické stanice nedaleko Hospodského rybníka. V letošním roce je to již padesát šest let, kdy je zde měřen výpar z vodní hladiny pro potřeby dnešního Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i. (dále jen VÚV TGM). V průběhu let se zde také začalo se systematickým sledováním výparu jako složky hydrologické bilance. Tato stanice je jedinou nezrušenou základní výparoměrnou stanicí na území České republiky (obr. 1).

Výpar z volné hladiny je jedním ze základních prvků vodní bilance. Je závislý na stavu atmosféry, který může být vyjádřen celou řadou faktorů, z nichž nejdůležitější jsou teplota vzduchu (vody), globální radiace slunečního záření, relativní vlhkost a proudění vzduchu (Berran aj., 2011). Velké množství faktorů, které územní výpar ovlivňují, způsobuje velkou proměnlivost jeho reálných hodnot na větším území. Výpar také patří mezi zřídka měřené veličiny, a proto musí být velmi často určován z matematických vztahů, které obsahují změřitelné meteorologické veličiny (Allen, 1998).

Prvním cílem práce bylo zkompletovat a zdigitalizovat co největší množství dat, u těchto časových řad meteorologických veličin poté provést statistické analýzy, potvrdit či vyvrátit existenci trendů, případně další změny v jejich časových průbězích. V druhé části práce bylo cílem odvodit regresní vztahy nenáročné na počet měřených meteorologických veličin pro výpočet výparu z volné hladiny na základě dat změřených ve stanici Hlasivo a porovnat je se vztahy odvozenými ve VÚV TGM na základě dat ze stanice Hlasivo z let 2001 až 2005 (Mrkvičková, 2007).

Statistická analýza pozorovaných řad výparu a dalších meteorologických veličin ve stanici Hlasivo

Data a metody

Pro roky 1957 až 1992 byla data k dispozici ve formě desetidenních průměrů. Tyto údaje byly zapsány ručně v meteorologických denících a pro další analýzy musely být převedeny do digitální formy. Do roku 1998 byly hodnoty získávány v denním intervalu a se zřízením automatické meteorologické stanice jsou měřeny nepřetržitě a vyhodnocovány každých patnáct minut. Statistická analýza se zabývá třiapadesátiletou řadou pro roky 1957 až 2009.

Od počátku existence stanice jsou sledovány i základní meteorologické veličiny: teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, srážkový úhrn, rychlost větru, sluneční radiace. Od roku 1998 jsou všechny veličiny zaznamenávány automaticky, a to včetně hodnot teploty půdy v 5, 10, 20, 30 a 50 cm pod povrchem. Přehled současných měřených veličin je uveden v tabulce 1.

Od svého vzniku prošlo zařízení výparoměrné stanice mnoha změnami. Byly postupně instalovány tyto přístroje: srovnávací výparoměr (od r. 1956), výparoměr Ronův (1954–1965), výparoměr Wildův (1956–1990), výparoměr GGI 3000 (od r. 1957), výparoměr 500 cm² – tzv. mikrovýparoměr (1956–1961), výparoměr 1 m² hl. 100 cm (1958–1961), výparoměr 1 m² hl. 65 cm (1960–1965), výparoměr Class-A-Pann (od r. 1962), výparoměr 3 m² (1964–1965). Na blízkém rybníce byl také umístěn na voru plovoucí výparoměr o ploše 1 m², později 3 m². V současné době je tedy výpar měřen srovnávacím výparoměrem, výparoměrem GGI 3000 a typem Class-A-Pann.

Výpar se měří obvykle v období od dubna do října, kdy se teplota pohybuje většinou nad bodem mrazu a nedochází k zamrznutí výparoměrného zařízení. Ve stanici Hlasivo se po mnohaletých zkušenostech omezila měřicí perioda na měsíce květen až říjen. Pro statistické analýzy byla použita pouze sezonní data od počátku května do konce října.

Hodnoty výparu a ostatních analyzovaných veličin byly zprůměrovány na řady dat o stejném denním (od roku 1993), měsíčním nebo ročním kroku. Takto připravené časové řady byly dále zkoumány za použití tabulkového procesoru Excel a statistického programu CTPA (Change and Trend Problem Analysis).

Program CTPA byl vyvinut v ČHMÚ a slouží jako nástroj pro detekci náhlých nebo postupných změn (trendů) v analyzovaných řadách.



Obr. 1. Celkový pohled na výparoměrnou stanici Hlasivo
Fig. 1. Global view of the Hlasivo station

Tabulka 1. Seznam v současnosti měřených veličin
Table 1. List of contemporary measured values

Teplota vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země	Teplota půdy v hloubce 30 cm
Relativní vlhkost vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země	Teplota půdy v hloubce 50 cm
Teplota půdy v hloubce 5 cm	Rychlost a směr větru 10 m nad povrchem země
Teplota půdy v hloubce 10 cm	Úhrn a intenzita srážek
Teplota půdy v hloubce 20 cm	Globální sluneční radiace
	Teploty vody ve výparoměrech

Základními testovanými charakteristikami jsou střední hodnota a rozptyl. Program zahrnuje širokou škálu nástrojů pro testování časových řad (Procházka aj., 2001).

Použity byly testy z balíku Testy (I) (Procházka aj., 2001). Hladina významnosti byla u všech testů zvolena $\alpha = 0,05$ (popř. $\alpha = 0,1$).

Test přítomnosti trendu – tento test přítomnosti trendu zjišťuje, zda je směrnice (parametr b_1) v modelu jednoduché lineární regrese rovna nule ($b_1 = 0$) proti alternativě, že je směrnice různá od nuly ($b_1 \neq 0$). Vychází se tedy z hypotézy, že se střední hodnota řady v čase nemění oproti alternativě existence lineárního trendu.

Test vzniku trendu (test vzniku záporného nebo kladného trendu za předpokladu spojitosti) – v tomto testu je nulovou hypotézou předpoklad řady s neměnnou střední hodnotou, který se testuje oproti alternativě vzniku trendu v bodě, jehož polohu test odhaduje. Přitom se v bodě vzniku trendu předpokládá spojitost trendových křivek.

Test změny směrnice trendu (test změny směrnice trendu za předpokladu spojitosti) – testuje se nulová hypotéza, že v řadě existuje konstantní trend oproti alternativě změny směrnice trendu, tj. vzniku zlomu v trendové přímce v odhadnutém bodě.

Test změny trendu (obecný test změny trendu bez předpokladu spojitosti) – testuje se nulová hypotéza, že v řadě existuje konstantní trend, oproti alternativě obecné změny parametrů trendové přímky v odhadnutém bodě.

Testování trendů v řadách průměrných teplot vzduchu, relativních vlhkostí vzduchu a úhrnů srážek

Při statistické analýze trendů v naměřených sezonních hodnotách teplot, relativních vlhkostí a atmosférických srážek nebyl potvrzen žádný statisticky významný trend. Testy byly prováděny na zvolené hladině významnosti 0,05 a poté i 0,1. V průměrných hodnotách sezonních teplot ve výšce 2 m nad zemí nebyl nalezen téměř žádný trend. Trendová přímka má směrnici 0,005. Po provedení detailnější analýzy každého měsíce od května do října zvláště bylo zjištěno, že měsíce květen, červenec a srpen se v průběhu let oteplují. Pro zbylé měsíce byl určen klesající trend teplot vzduchu. Statisticky významný stoupající trend byl potvrzen pouze pro průměrné teploty vzduchu v měsíci srpnu, a to se směrnici trendové přímky 0,024. Výsledky analýzy trendů v řadách průměrných teplot vzduchu jsou uvedeny

v *tabulce 2*. Pro hodnoty průměrné relativní vlhkosti byl nalezen jakýsi statisticky nevýznamný vznik trendu na začátku osmdesátých let. Do této doby je střední hodnota relativních vlhkostí konstantní a po roce 1980 se objevuje mírný stoupající trend v těchto hodnotách. Směrnice trendových přímk se pohybují od 0,089 do 0,283. Pro průměrné hodnoty za celé sezony je pozorovatelný vznik trendu v roce 1981 se směrnicí o velikosti 0,11. Celkový trend pro sezonní hodnoty relativní vlhkosti je mírně stoupající o směrnicí 0,019. Když se hladina významnosti zvýšila z 0,05 na 0,1, byl určen statisticky významný trend v měsících červen, září a říjen. Přehled ukazuje *tabulka 3*. Statisticky významný trend jak na hladině významnosti 0,05, tak 0,1 nebyl potvrzen ani pro průměrné hodnoty úhrnů srážek. Vývoj průměrných sezonních hodnot je však klesající s trendovou přímkou o záporné směrnicí -0,770. Pro měsíce květen, červen a říjen je směrnice záporná a pro zbylé měsíce naopak kladná. Pomocí testů vzniku trendu a změny sklonu trendu nebylo indikováno žádné významné trendové chování. Přehled výsledků statistické analýzy průměrných sezonních hodnot úhrnů srážek je uveden v *tabulce 4*.

Testování trendů v řadách průměrných hodnot výparu změřeného srovnávacím výparoměrem

Hodnoty sezonního výparu změřeného srovnávacím výparoměrem vykazují v průběhu let 1957 až 2012 stoupající trend (*obr. 2*). Programem CTPA byl tento trend vyhodnocen jako statisticky významný se směrnicí trendové přímk 0,011. Statisticky významný byl také test vzniku trendu a test změny sklonu trendové přímk. Vznik trendu byl určen v roce 1985, od kterého je směrnice 0,026. Podle testu změny sklonu trendové přímk byl trend do roku 1984 *mírnější*, a sice 0,005 a po tomto roce začal stoupat strměji se směrnicí 0,023. Analýza trendů v hodnotách výparu pro jednotlivé měsíce je shrnuta v *tabulce 5*.

Závěr 1

Došlo ke zkompletování a zdigitalizování časových řad sezonních výparů ze srovnávacího výparoměru, dále pak sezonních meteorologických veličin – teplota vzduchu ve 2 m nad zemí, relativní vlhkost vzduchu ve 2 m nad zemí a úhrn atmosférických srážek v měsíčním kroku od roku 1957 do roku 2012 – měřených ve výparoměrné stanici Hlasivo.

V časových řadách sezonních meteorologických veličin nebyl detekován žádný statisticky významný trend, pouze byl pozorován mírný stoupající trend pro hodnoty teplot (0,005) a pro relativní vlhkost (0,019). Pozorovaný trend pro hodnoty úhrnů srážek byl záporný (-0,770).

Pro hodnoty výparu změřeného srovnávacím výparoměrem byl určen statisticky významný stoupající trend o směrnicí trendové přímk 0,011 na hladině významnosti 0,05. Podle analýzy dochází od osmdesátých let ke strmějšímu nárůstu sezonního výparu, což potvrdil test změny sklonu trendové přímk.

Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny na základě dat změřených srovnávacím výparoměrem

Data a metody

Vztahy pro výpočet výparu z vodní hladiny byly odvozovány podle naměřených meteorologických dat z výzkumné stanice Hlasivo pro roky 2006–2012. Vzhledem k tomu, že naměřené denní hodnoty výparu bývají zatíženy značnou náhodnou chybou a také vzhledem k tomu, že při řešení praktických úloh je potřeba ve většině případů stanovit velikost výparu za období jednoho měsíce nebo ještě za delší období (Mrkvičková, 2007), byla k odvozování používána data v měsíčním kroku. K dispozici byly měsíční řady: teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, teplota vody ve výparoměru, globální

Tabulka 2. Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezonních hodnotách teploty vzduchu ve výšce 2 m nad zemí (v závorkách jsou uvedeny hodnoty trendu před a po změně)
Table 2. Statistical trend analysis – seasonal mean air temperature (numbers in brackets – trend values before and after the change)

Teplota	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
sezona	ne 0,005	ne	ne	ano (0,021) 1976 (0,017)
květen	ne 0,017	ne	ne	ano (0,093) 1977 (0,024)
červen	ne -0,001	ne	ne	ano (-0,017) 2002 (0,052)
červenec	ne 0,009	ne	ne	ano (0,002) 2004 (0,078)
srpen	ano 0,024	ne	ne	ano (0,033) 1977 (0,035)
září	ne -0,007	ne	ne	ano (-0,011) 1998 (0,072)
říjen	ne -0,015	ne	ne	ano (-0,007) 2000 (-0,076)

Tabulka 3. Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezonních hodnotách relativní vlhkosti vzduchu

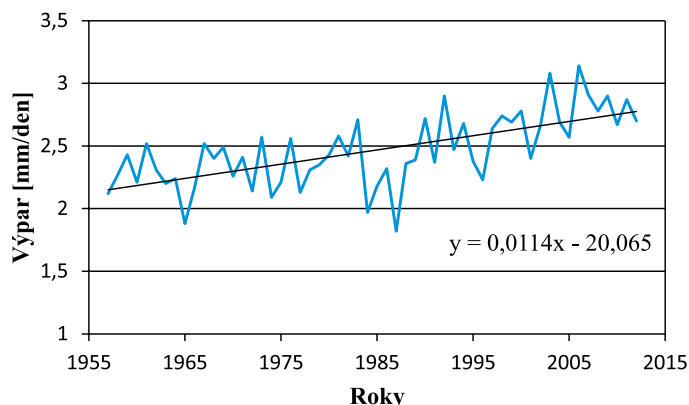
Table 3. Statistical trend analysis – seasonal mean relative air humidity (numbers in brackets – trend values before and after the change)

Vlhkost	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
sezona	ne 0,019	ne (1981) 0,11	ne	ano (-0,184) 1971 (0,130)
květen	ne -0,001	ne	ne	ne
červen	ne 0,045	ne (1975) 0,089	ne	ano (0,059) 2005 (-0,179)
červenec	ne 0,019	ne (1982) 0,156	ne	ano (-0,017) 1998 (-0,242)
srpen	ne -0,068	ne	ne	ano (-0,163) 1999 (-0,253)
září	ne 0,042	ne (1981) 0,147	ne	ano (0,020) 1999 (-0,177)
říjen	ne 0,076	ne (1982) 0,283	ano (-0,320) 1982 (0,263)	ano (-0,665) 1973 (0,204)

Tabulka 4. Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezonních hodnotách úhrnů srážek

Table 4. Statistical trend analysis – seasonal mean precipitation (numbers in brackets – trend values before and after the change)

Srážky	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
sezona	ne -0,770	ne	ne	ano (-5,959) 1976 (0,951)
květen	ne -0,440	ne	ne	ano (-0,347) 1988 (1,320)
červen	ne -0,188	ne	ne	ano (-0,575) 1998 (1,386)
červenec	ne 0,455	ne (2002) 6,321	ne	ano (-0,728) 1995 (2,475)
srpen	ne 0,042	ne (1997) 1,885	ne	ne
září	ne 0,046	ne (2001) -1,809	ne	ano (0,113) 1993 (-1,128)
říjen	ne -0,044	ne	ne	ano (-0,437) 1997 (-1,125)



Obr. 2. Průběh průměrného sezonního výparu s vyznačenou trendovou přímkou

Fig. 2. Mean seasonal evaporation with trend line

sluneční radiace a rychlost větru. Výpar byl měřen srovnávacím výparoměrem.

Nejprve byly určeny párové závislosti výparu z vodní hladiny na jednotlivých meteorologických veličinách ve vybraném sedmiletém období 2006–2012. Nejtěsnější závislost výparu z vodní hladiny (mocninná) byla zjištěna u globální sluneční radiace ($R^2 = 0,823$). Následovala lineární závislost na průměrné měsíční teplotě vody ($R^2 = 0,79$) a lineární závislost na teplotě vzduchu ($R^2 = 0,756$). Závislost výparu na měsíčních hodnotách relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru není tak významná. Přehled nejvýznamnějších párových regresních vztahů je uveden v *tabulce 6*.

K odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny byly použity dvě metody:

1. Za pomoci rovnice párové regrese vybrané meteorologické veličiny na výparu byl vypočítán výpar a následně spočítány rozdíly (rezidua) mezi výparem měřeným a vypočteným. V dalším kroku byla vyjádřena závislost vypočítaných reziduí na ostatních měřených řadách meteorologických veličin a následně vybrána ta nejtěsnější. Kombinací těchto dvou regresních vztahů byla určena rovnice 4, kde je výpar vyjádřen za pomoci teploty vzduchu a rychlosti větru a rovnice 7, ve které je výpar počítán za pomoci teploty vody a rychlosti větru.
2. Druhá metoda zahrnovala použití doplňku programu MS Excel Optmiz.xla, který řeší nelineární regresi. Provádí iterativní fitování nelineární funkce pomocí metody nejmenších čtverců za použití Levenberg-Marquardt algoritmu (Lourakis, 2005). Vstupní proměnné jsou vektor vstupních dat, vektor nezávislých proměnných, počáteční hodnoty parametrů a vložení struktury vzorce. Touto metodou byly vyjádřeny rovnice 5 (výpar vyjádřen za pomoci teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu) a rovnice 6 (teplota vzduchu a teplota vody).

Nově odvozené vztahy pro výpočet výparu z volné hladiny byly porovnány se vztahy odvozenými v roce 2007 ve VÚV TGM. Tyto vzorce byly určovány mnohonásobnou regresí podle dat ze stanice Hlasivo z roku 2001 až 2005. K vyjádření byl použit program NEREG pro odvození nelineárních regresních vztahů (Mrkvičková, 2007).

Výsledky

Níže jsou uvedeny rovnice párových regresí (1–3) a odvozené rovnice regrese (4–7). Nově odvozené regresní vztahy nejsou náročné na vstupní data, vyžadují vždy pouze dvě měřené meteorologické veličiny, což je nesporná výhoda při řešení praktických úloh. Dvojice použitých veličin jsou teplota vzduchu – rychlost větru (4), teplota vzduchu – relativní vlhkost (5), teplota vzduchu – teplota vody (6) a teplota vody – rychlost větru (7). Dále jsou uvedeny rovnice (8–11) odvozené ve VÚV TGM v roce 2007 (Mrkvičková, 2007)

$$E_1 = 0,2157 \cdot T_{VZD} + 0,1133 \quad (1)$$

$$E_2 = 0,1966 \cdot T_{VOD} - 0,4724 \quad (2)$$

$$E_3 = 0,0011 \cdot R^{0,9235} \quad (3)$$

$$E_4 = 0,2157 \cdot T_{VZD} + 0,726 \cdot V - 1,2259 \quad (4)$$

$$E_5 = 0,12733 \cdot T_{VZD}^{1,0813} - 0,0445 \cdot H + 4,2107 \quad (5)$$

$$E_6 = -1496645 \cdot T_{VZD}^{-1,5E-7} + 0,1802 \cdot T_{VOD} + 1496644 \quad (6)$$

$$E_7 = 0,1966 \cdot T_{VOD} + 0,6639 \cdot V - 1,4893 \quad (7)$$

$$E_8 = 1,2061 \cdot T_{VZD}^{1,0712} - 1,3906 \cdot T_{VZD} + 1,7986 \quad (8)$$

$$E_9 = -2,5976 \cdot T_{VZD}^{0,6608} + 0,7686 \cdot T_{VZD} + 2,0184 \cdot T_{VOD}^{0,6537} - 0,3749 \cdot T_{VOD} + 0,1917 \quad (9)$$

$$E_{10} = 0,104 \cdot T_{VOD} + 0,206 \cdot H^{0,913} - 18,368 \cdot e^{H \cdot 5,63 \cdot 10^{-3}} - 2,101 \cdot e^{-2,92 \cdot 10^{-5} \cdot R} + 0,503 \cdot V + 19,913 \quad (10)$$

$$E_{11} = 0,0837 \cdot T_{VZD} + 0,278 \cdot H^{0,768} - 12,146 \cdot e^{H \cdot 5,59 \cdot 10^{-3}} - 2,912 \cdot e^{-2,77 \cdot 10^{-5} \cdot R} + 0,453 \cdot V + 13,644 \quad (11)$$

Tabulka 5. Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezonních hodnotách výparu měřeného srovnávacím výparoměrem

Table 5. Statistical trend analysis – seasonal mean evaporation (numbers in brackets – trend values before and after the change)

Srovnávací výparoměr	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr	existence			
sezona	ano 0,011	ano 1984 (0,026)	ano (0,005) 1984 (0,023)	ano (0,009) 1973 (0,017)
květen	ano 0,014	ano 1964 (0,016)	ano (-0,008) 1964 (0,016)	ano (0,019) 2000 (0,004)
červen	ne 0,007	ne 1987 (0,033)	ne (-0,010) 1987 (0,025)	ano (-0,009) 1974 (0,017)
červenec	ano 0,011	ne 1977 (0,017)	ne	ano (0,012) 1994 (0,032)
srpen	ano 0,014	ano 1978 (0,027)	ano (-0,010) 1978 (0,023)	ano (0,019) 1974 (0,027)
září	ano 0,011	ne 1986 (0,027)	ano (0,002) 1986 (0,024)	ano (0,000) 1996 (-0,005)
říjen	ne 0,008	ne	ne	ano (0,011) 1998 (0,032)

- E – průměrná měsíční výška výparu z vodní hladiny [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$],
 T_{VZD} – průměrná měsíční teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$] ve výšce 2 m nad povrchem země,
 T_{VOD} – průměrná měsíční teplota vody ve výparoměru [$^{\circ}\text{C}$],
 H – průměrná měsíční hodnota relativní vlhkosti vzduchu [%],
 R – měsíční suma globální sluneční radiace [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$],
 V – průměrná měsíční rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Při použití všech výše uvedených vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny se průměrná relativní odchylka mezi modelovanými a měřenými hodnotami výparu pohybuje do 27 %. Pro nově odvozené vztahy je odchylka od 12 do 14 %. Při použití prosté párové regrese jsou odchylky od 13,5 do 15 %. Nicméně průměrné relativní odchylky vycházející pro vzorce z roku 2007 se pohybují od 16 do 27 %. Srovnání změřených výparů s výpary vypočtenými výše uvedenými vzorci ukázalo, že střední absolutní chyba byla menší u nově odvozených vztahů vyžadujících vždy jen dvě měřené veličiny než při použití vzorců z roku 2007 vyžadujících buď jednu, dvě nebo čtyři měřené meteorologické veličiny. Střední absolutní chyba pro nově odvozené vzorce se pohybuje od 0,28 mm do 0,35. U vzorců z roku 2007 je od 0,36 do 0,88. To jsou horší výsledky než při použití prosté párové regrese, kdy se střední absolutní chyba pohybovala od 0,33 do 0,36 mm.

Z uvedených výsledků vyplývá, že nově odvozené vztahy pro výpočet výparu z volné hladiny dávají při použití měsíčních dat lepší výsledky. Nejlepší shody vypočtených a měřených výparů je dosaženo při použití nově odvozených vztahů se zastoupením měřených meteorologických veličin: teplota vody ve výparoměru – rychlost větru, resp. teplota vzduchu – rychlost větru. Minimální relativní odchylka 14 % mezi modelovanými výpary se jeví jako dostatečná, je tedy pro řešení praktických úloh možné použít vzorců vyžadujících měřené veličiny teplota vzduchu – teplota vody ve výparoměru, resp. teplota vzduchu – relativní vlhkost vzduchu.

Jelikož byly regresní vztahy pro výpočet výparu odvozeny na základě dat měřených pouze v sezoně květen až říjen, znamená to, že platnost těchto vztahů je omezená. Při aplikaci rovnic ve dnech s nízkou teplotou vzduchu (blízkí se nule) nebude dosaženo přesných výsledků.

Veškeré výsledky porovnání modelovaných výparů s měřenými výpary v období sezon (květen až říjen) v letech 2006–2012 jsou vedeny v *tabulce 6*, srovnání modelovaných hodnot výparu s hodnotami měřenými je zobrazeno na *obr. 3*.

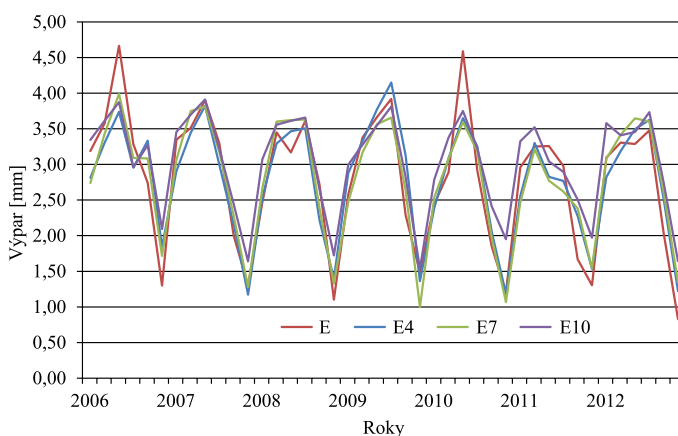
Závěr 2

Na základě měřených dat (2006–2012) z výparoměrné stanice Hlasivo byly odvozeny čtyři nové vztahy pro výpočet výparu z volné hladiny. Každá z rovnic vyžaduje vždy pouze dvě měřené meteorologické veličiny (teplota vody ve výparoměru – rychlost větru, teplota vzduchu – rychlost větru, teplota vzduchu – teplota vody ve výparoměru, teplota vzduchu – relativní vlhkost vzduchu). Při srovnání se vzorci odvozenými ve VÚV TGM v minulosti na základě měřených dat ze stanice Hlasivo z let 2001–2005 vychází z hlediska střední absolutní chyby a průměrné relativní odchylky lepší výsledky

Tabulka 6. Porovnání výsledků jednotlivých rovnic; R^2 – koeficient determinace, MAE – střední absolutní chyba, MRE – střední relativní odchylka; (T_{vzd} – teplota vzduchu, T_{vod} – teplota vody ve výparoměru, R – globální sluneční radiace, V – rychlost větru, H – relativní vlhkost vzduchu)

Table 6. Result assesment of derived equations: R^2 – coefficient of determination, MAE – mean absolute error, MRE – mean relative error; (T_{vzd} – air temperature, T_{vod} – temperature of water evaporimeter, R – solar radiation, V – wind speed, H – relative air humidity)

Rovnice	Výpar	R^2	MAE [mm]	MRE
1	$f(T_{vzd})$	0,7562	0,361	14,9 %
2	$f(T_{vod})$	0,7895	0,327	14 %
3	$f(R)$	0,8226	0,331	13,5 %
4	$f(T_{vzd}, V)$	0,8434	0,295	12,1 %
5	$f(T_{vzd}, H)$	0,7947	0,346	14 %
6	$f(T_{vzd}, T_{vod})$	0,79	0,327	14 %
7	$f(T_{vod}, V)$	0,8612	0,28	11,9 %
8	$f(T_{vzd})$	0,7423	0,44	19 %
9	$f(T_{vzd}, T_{vod})$	0,7776	0,415	16 %
10	$f(T_{vzd}, H, R, V)$	0,8807	0,357	17,6 %
11	$f(T_{vzd}, H, R, V)$	0,8571	0,821	27,2 %



Obr. 3. Průběh měřeného a vypočteného výparu: E (měřený výpar), E4, E7, E10 (výpar vypočtený podle rovnice 4, 7, resp. 10)

Fig. 3. Measured and calculated evaporation: E (measured evaporation), E4, E7, E10 (calculated evaporation by equation 4, 7 and 10)

pro nově odvozené vztahy. Nespornou výhodou nově odvozených vzorců pro praktické použití je menší náročnost na vstupní data.

Poděkování

Článek vznikl v rámci výzkumného záměru MZP0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů (financováno MŽP) – vychází z výsledků části Vývoj matematických modelů hydrologické bilance, identifikace jejich parametrů a ověřování experimentálním výzkumem zahrnuté do oddílu A (hydrologie) a také v rámci řešení projektu Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn (TA01020508), který je podporován Technologickou agenturou ČR.

Literatura

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Reas, D., and Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. ISBN 92-5-104219-5.
- Beran, A., Horáček, S. a Hanel, M. (2011) Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu BILAN. VTEI, roč. 53, mimoř. č. III, příloha Vodního hospodářství č. 11/2011, s. 15–18. ISSN 0322-8916.

Lourakis, M.I. (2005) A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar. Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology, 11.

Mrkvičková, M. (2007) Vyhodnocení měření na výparoměrné stanici Hlasivo. VTEI, roč. 49, mimoř. č. II, příloha Vodního hospodářství č. 6/2007, s. 9–11. ISSN 0322-8916.

Procházka, M., Deyl, M. a Novický, O. (2001) Uživatelský manuál k programu CTPA (Technology for detecting trends and changes in time series of hydrological and meteorological variables).

Ing. Adam Beran^{1,2}, Ing. Adam Vizina^{1,2}

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha

²Fakulta životního prostředí,

Česká zemědělská univerzita v Praze

adam_beran@vuv.cz, adam_vizina@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Derivation of regression equations for calculation of evaporation from a free water surface and identification of trends in measured variables in Hlasivo station (Beran, A.; Vizina, A.)

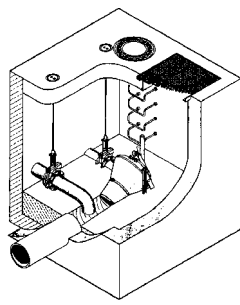
Keywords

evaporation from free water level – Hlasivo station – program CTPA – statistical analysis

Evaporation from a free water surface is one of the important factors affecting the total water balance of a catchment. Due to the complicated direct measurements methods, evaporation is calculated from meteorological variables based formulas. Paper evaluates data of evaporation, air temperature, relative air humidity and precipitation from Hlasivo station from seasons from May to October of 1957 to 2012.

Hlasivo station near Tábor city was built in 1957. It has fifty-six old history of evaporation measuring for purposes of TGM Water Research Institute, p.r.i. Over the years, it was started with a systematic monitoring of evaporation as a component of the hydrological balance. Hlasivo station is the only station in the Czech Republic where evaporation measurement is not cancelled.

In the first part, paper describes the results of statistical analyses of evaporation, air temperature, relative air humidity and precipitation. Statistical program CTPA (Change and Trend Problem Analysis) was used. Significant upward trend was identified only in the evaporation values. Second part of the paper describes the derivation of equations for calculating the evaporation based on meteorological variables regression. The evaporation was modelled with newly derived relationships and the results were compared. The best results were obtained using the formula based on the water temperature (air temperature) and wind speed.



PFT
Prostředí
a fluidní technika, s.r.o.

Nad Bezednou 201, 252 61 Dobrovíz
telefon: 233 311 302, 233 311 389
fax: 233 311 290
www.pft-uft.cz
e-mail: pft@pft-uft.cz

**Dodavatel vstrojení
kanalizačních objektů**

- regulace odtoku z odleh. komor
- čištění dešťových zdrží
- protipovodňová ochrana
- pneumatická doprava splašků

Virový ventil v suché šachtě
FluidCon

Reakce na článek Vliv fyzicko-geografických charakteristik na velikost povodně v srpnu 2002 autorů L. Kašpárka a M. Pelákové

Autoři příspěvku Vliv fyzicko-geografických charakteristik na velikost povodně v srpnu 2002 uveřejněného ve VTEI 3/2013, resp. ve Vodním hospodářství 6/2013 se pokusili statisticky identifikovat vliv vybraných fyzicko-geografických charakteristik na velikost odtoku za povodně 2002. Nechci zde příliš polemizovat s použitou metodikou či dosaženými výsledky, avšak je nezbytné uvést, že výsledky jsou ovlivněny výběrem povodí, na nichž byla analýza provedena. Domnívám se, že výběr byl proveden na základě tabulky 3.1 ze zprávy o povodni [1], která však neobsahuje všechna povodí a některá, která by dle mého názoru výsledky významně ovlivnila, zde chybí (například nejhořejší Labe, Chrudimka, Doubrava, horní Svratka, horní Jihlava).

Dovolím si však především doplnit diskusi k uvedeným výsledkům, která podle mého názoru ne zcela dostatečně reflektuje stávající stav poznání procesu tvorby odtoku. K tomu však musím současně uvést, že toto téma se snažím v českém prostředí svým způsobem popularizovat, a nejsem proto zcela objektivní, resp. se přiznávám, že touto reakcí sleduji jasné cíle právě v popularizaci teorie tvorby odtoku.

Tak tedy, autoři vyhodnotili závislost maximálního specifického průtoku na příčinné srážce ve výši 64 %, s čímž intuitivně souhlasím, a závislost na předchozím nasycení ve formě ukazatele předchozích srážek ve výši 5 %, kde již nemohu tak lehce souhlasit, a to hlavně ze dvou důvodů.

Za prvé, uvedený ukazatel, ač chápu jeho výběr z pragmatických důvodů, nedoceňuje skutečný vliv počátečního nasycení na vznik odtoku. Řada výzkumů (např. [3, 4]) identifikovala pravděpodobnou existenci prahového procesu vzniku odtoku z povodí, kdy prahová hodnota i intenzita odtokové reakce po jejím překročení je specifická pro každé povodí (do toho se pochopitelně promítají fyzicko-geografické vlastnosti povodí včetně těch testovaných autory). Lze se domnívat, že odtok je výsledkem prahového procesu se dvěma víceméně lineárními závislostmi, jak ilustruje obr. 1. Při malých srážkových úhrnech k odtoku nedochází vůbec, při překročení prahové hodnoty (lomového bodu) je odtoková reakce rychlá a významná. Teď se však dostáváme k jádru věci a tou je počáteční stav povodí, jež se v každém okamžiku nachází někde na uvedené lomené křivce. Po většinu času to je pod lomovým bodem, avšak existují i povodí, která přes lomový bod víceméně neprocházejí a pohybují se pouze po části uvedené křivky.

Zásadním problémem provedené analýzy je, že ke všem povodím přistupuje identicky z hlediska předpokladu, že stejná hodnota API (ukazatele předchozích srážek) indikuje

u vybraných povodí i stejné počáteční nasycení, respektive stejné poměrné zaplnění celkové maximální retence povodí, nebo chcete-li stejnou počáteční pozici na uvedené individuální křivce odtoku na obr. 1.

Určitou představu o možném vlivu počátečního nasycení ilustruje obr. 2 převzatý ze zprávy po vyhodnocení povodně [1].

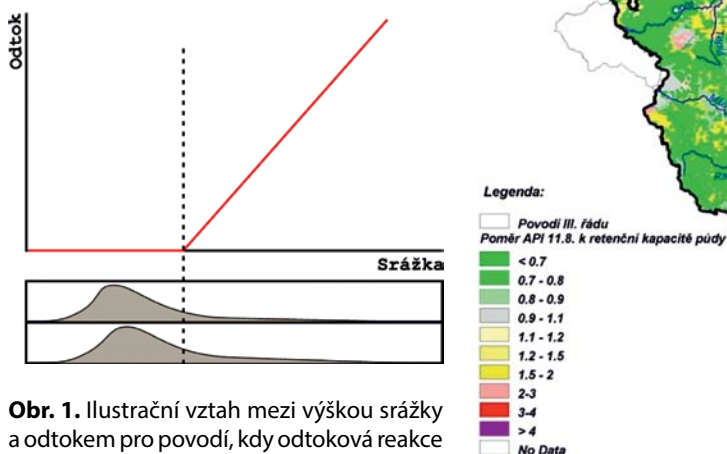
Druhým důvodem mého nesouhlasu je výběr povodí omezený pouze na subset nejvíce odtokově postižených povodí. Domnívám se tak, že pokud by byla zařazena i výše zmíněná povodí, u nichž, ač byla postižena srážkami, vedlo jejich relativně menší počáteční nasycení k menší odtokové reakci, výsledky by mohly být poněkud odlišné.

Vím, že autoři jsou si uvedeného vědomi, pouze bych chtěl touto cestou upozornit všechny čtenáře, že skutečný vliv počátečního nasycení na velikost odtokové reakce je výrazně větší, než naznačují výsledky prezentované studie (což je v souladu s některými jinými studiemi např. [2, 4]), a že výsledky nelze zobecňovat na jiné povodňové případy, natož na odtok jako takový. Dosažené výsledky jsou pouze vyhodnocením vlivu v průběhu jedné konkrétní povodně, respektive vysvětlením rozdílné odtokové reakce na omezeném souboru nejvíce zasažených povodí.

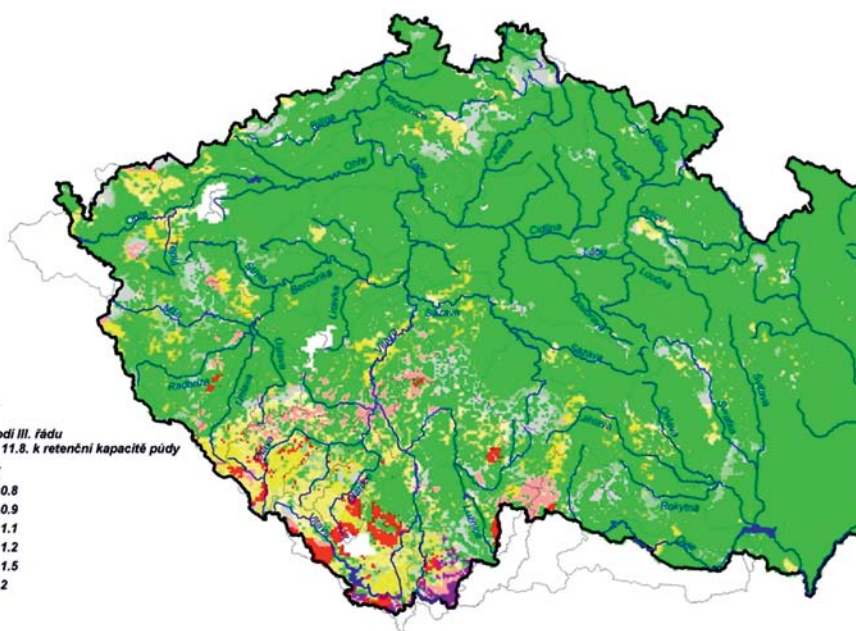
RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D.
Český hydrometeorologický ústav
danhelka@chmi.cz

Literatura

- [1] ČHMÚ (2003) Hydrologické vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002. Praha: ČHMÚ, 146 s. dostupné na [www: <http://voda.chmi.cz/pov02/2etapa/obsah2.html>](http://voda.chmi.cz/pov02/2etapa/obsah2.html)
- [2] Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., and Gaume, E. (2010) Climatic and geomorphic controls on flash flood response in Europe. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 12, EGU2010-9328, 2010, EGU General Assembly 2010.
- [3] McGlynn, B.L. and McDonnell, J.J. (2003) Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics. *Water Resour. Res.*, 39 (4), 1090, doi:10.1029/2002WR001525
- [4] Uchida, T., McDonnell, J.J., and Asano, Y. (2006) Functional intercomparison of hillslopes and small catchments by examining water source, flowpath and mean residence time. *Journal of Hydrology*, 327, p. 627–642, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.037



Obr. 1. Ilustrační vztah mezi výškou srážky a odtokem pro povodí, kdy odtoková reakce závisí na aktuální poloze stavu povodí (nasycení předchozími srážkami) na uvedené křivce (schematizována podle [4])



Obr. 2. Obrázek 3.3. ze zprávy o povodni, „Poměr ukazatele předchozích srážek (API 30) ze dne 11. 8. 2002 k retenční vodní kapacitě půdy“

Elektromagnetická (indukční) měřidla rychlosti a ISO 3455:2007

Daniel Mattas, Libuše Ramešová

Od roku 2007 platí mezinárodní norma ISO 3455:2007 Hydrometry. Calibration of current-meters in straight open tanks [1], která nahrazuje dřívější verzi ISO 3455:1976 Liquid flow measurement in open channels. Calibration of rotating-element current-meters in straight open tanks. Z této dřívější verze vychází i naše ČSN ISO 3455 (259322) Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích z roku 1994, která je jejím identickým překladem. Nová verze ISO 3455:2007 se zatím do soustavy tuzemských norem nedostala.

ISO 3455 toho z hlediska kalibrace vodoměrných vrtulí s výjimkou nové kapitoly 6 Computerized data acquisition and processing system, která je navíc zajímavá jen pro kalibrační laboratoře, mnoho nového nepřináší. Co je však zcela nové a mělo by mít zásadní dopad na vodohospodářskou praxi, je kapitola 7.2 Calibration of electromagnetic meters (Kalibrace elektromagnetických měřidel).

Je nám známo, že těchto měřidel je v ČR používáno značné množství. Jejich výskyt v naší kalibrační laboratoři je však omezen jen na několik málo zákazníků, kteří je používají pro úřední měření, a tudíž potřebují oficiální kalibrační list. Obliba těchto měřidel je vcelku pochopitelná, protože jsou robustní, nemají žádné pohyblivé části a ve srovnání s klasickou vrtulí je jejich údržba výrazně jednodušší, dovolují měření rychlosti i v podmínkách, kde vrtule selhává (vodní rostliny, malé rychlosti, $v < \text{ca } 0,05 \text{ ms}^{-1}$ apod.), navíc vyhodnocovací jednotka měřidla udává přímo časově střední rychlost bez nutnosti přepočtu. Zde je však skryt problém, kterému zřejmě naprostá většina uživatelů tohoto typu měřidla buď nevěnuje pozornost, nebo spíše o něm vůbec neví (jak ukazuje naše zkušenost) – i tato měřidla totiž vyžadují pravidelnou kalibraci [2], protože údaj na displeji a skutečná rychlost se mohou i dosti značně lišit. A soudě podle výše zmíněného článku nové normy se zřejmě nejedná jen o zkušenost naši.

Norma v kap. 7.2 stanovuje požadavky, které má splnit kalibrační laboratoř, avšak hovoří i o podmínkách a situacích dávajících vznik nutnosti recalibrace měřidla, což je podstatné a zásadní z hlediska uživatele. Toho se týká článek 7.2.2 (dále uvádíme jeho překlad):

„Elektromagnetické měřidlo rychlosti neobsahuje pohyblivé součásti; je provozně robustní a méně potřebuje periodickou kalibraci ve srovnání s hydrometrickou vrtulí při stejné četnosti a podmínkách užití. Nicméně elektromagnetické měřidlo má být periodicky kontro-

lováno z hlediska svého chování a elektrického driftu vyhodnocovací jednotky srovnáním s referenčním standardem (není definováno jakým a jak – pozn. autorů) a pokud je shledáno, že se chování změnilo v nepřijatelném stupni (není definováno v jakém – pozn. autorů), měřidlo má být recalibrováno.

Má být zajištěno, aby měřidlo bylo kalibrováno ve své celistvosti jako odpovídající si souprava senzoru, vyhodnocovací jednotky a propojovacího kabelu. Pokud se kterýkoliv z těchto prvků změní, měřidlo má být recalibrováno.

Během užívání elektromagnetického měřidla má být pravidelně testován nulový bod umístěním měřidla do klidné vody a udržovány záznamy o tomto testu. Pokud se charakteristický výsledek těchto testů náhle změní nebo vykazuje pokračující změnu od původního stabilního stavu, měřidlo má být recalibrováno.

Chování elektronických součástí v sestavě elektromagnetického měřidla se může měnit v čase jako důsledek stárnutí. Proto má být elektronické měřidlo bez ohledu na jeho užívání recalibrováno každoročně.

Výsledek kalibrace přístroje je pravděpodobně též funkcí hydrodynamických charakteristik senzoru určených jeho specifickým tvarem a stavem drsnosti jeho povrchu. Náhodné poškození při používání může významně pozměnit tvar senzoru nebo jeho povrchovou úpravu. Za takových okolností má být provedena recalibrace měřidla.

V závislosti na specifickém návrhu měřícího systému může být omezena délka kabelu spojujícího senzor s vyhodnocovací jednotkou. Kalibrace specifického individuálního měřidla může být jedinečná pro specifickou délku a typ signálního kabelu použitého při kalibraci. Pokud je signální kabel zaměněn za kabel jiné délky, než byl použit při kalibraci, měřidlo má být recalibrováno s kabelem nové délky.

Uživatelé těchto měřidel pravděpodobně překvapuje požadavek každoroční kalibrace měřidla, a to i v případě, že není používáno. Již v předchozím příspěvku [2] jsme uvedli graf, jenž zde pro ilustraci opět uvádíme (obr. 1). Graf dokumentuje poměrně velmi rychlou změnu kalibrační konstanty, zde sklonu kalibrační přímky, v závislosti na čase. Měřidlo bylo kalibrováno víceméně pravidelně ve zhruba dvouletém cyklu s přerušením v r. 2003, kdy ČKSVM ještě odstraňovala následky povodně v r. 2002. Sklon kalibrační přímky se během jedenácti let změnil z hodnoty 1,006 na hodnotu 0,816, tedy velmi podstatně. Setkali jsme se však i s tím, že již při první kalibraci elektromagnetického měřidla v naší laboratoři byly hodnoty jím udávané vychýlené; nebylo nám však známo, zda a jak dlouho bylo měřidlo před kalibrací v provozu, ani nám nebylo známo datum jeho výroby.

Závěrem lze konstatovat, že jak z ISO 3455:2007, tak z našich zkušeností vyplývá zcela jednoznačný závěr: jakékoliv měřidlo, s nímž se má měřit přesně, musí být pravidelně kalibrováno. Měřidlo bez kalibrace může dávat hodnoty i dosti vychýlené a výsledek takového měření může být od skutečné hodnoty i značně vzdálen.

Literatura

- [1] ISO 3455:2007 Hydrometry. Calibration of current-meters in straight open tanks.
- [2] Mattas, D. a Ramešová, L. Nové poznatky z kalibrace atypických měřidel a vlivu teploty vody při kalibraci v České kalibrační stanici vodoměrných vrtulí. *VTEI*, 54, 2012, č. 4, s. 11–12, příloha *Vodního hospodářství* č. 8/2012.

Ing. Daniel Mattas, CSc., Ing. Libuše Ramešová
Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí
Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
Libuse_Ramesova@vuv.cz

Electromagnetic current-meters and ISO 3455:2007 (Mattas., D.; Ramešová, L.)

Standard ISO3455:2007 brings at the part 7.2 a brand new demand – calibration of electromagnetic current-meters. At the article, conditions when recalibration should be done are translated from the standard. Also according to our experience, electromagnetic current-meters should be recalibrated on regular basis because their characteristics can change with time (Fig. 1).



Obr. 1. Změna sklonu kalibrační křivky elektromagnetického měřidla v čase

Fig. 1. Change of slope calibration line with time for one current-meter

Obnova vodního režimu na výsypkách

Geomorfologický novotvar neboli antropogenní krajinný prvek či pro většinu lidí rozšířenější pojmenování – výsypka vzniká při povrchové těžbě nerostných surovin, kdy dochází k přesunutí milionů kubiků nadložní skryvkové zemině vedle nebo též vně exponovaného důlního místa (vnitřní a vnější výsypka) a následnému nasypání nových útvarů v krajině. Takto vzniklé útvary jsou předmětem rekultivací s cílem obnovit funkční prvky krajiny, obnovit krajinný ráz a dosáhnout maximální diversity a estetické hodnoty krajiny. Díky přírodě *de novo* vzbuzují takto vzniklé plochy zájem široké vědecké veřejnosti a vědeckých institucí.

Vodní režim jako nepostradatelná součást všech ekosystémů je nosným pilířem nové krajiny. Tento fakt platí i na výsypce. Obnova vodního režimu na takto vzniklých ekosystémech však s sebou nese i určitá rizika, počínaje projektováním a modelací terénu a konče abiotickými a biotickými vlivy.

Nevhodný pohyb podpovrchové vody, zejména neočekávané průsaky ve spodních vrstvách výsypek a do okolního prostředí, mohou vést k narušení stability svahů a způsobit jejich sesunutí. V minulosti byly v České republice zaznamenány četné sesuvy. Na některé si můžeme z nedávné doby ještě pamatovat, např. pod zámek Jezeří na Mostecku v těsné blízkosti dolu ČSA, kdy je i po letech kromě přírody bezprostředně ohrožován barokní zámek. Událost z roku 2011 z Chabařovic poblíž jezera Milada se týká sesuvu, kdy došlo k citelnému poškození části cyklostezky. V sedmdesátých letech 20. století posloužila výsypka k zakonzervování toxického odpadu – do tělesa výsypky lomu Hájek jihozápadně od Ostrova byla uložena skládka chemikálií ze středočeské chemičky. Vlivem srážek, spodních vod a nedostatečného zajištění stability svahů došlo k podmáčení spodních partií výsypky a následnému sesuvu zeminy, při němž bylo obnaženo těleso uložených chlorovaných organických látek. Ač se tato událost odehrála před čtyřiceti lety, důsledky nedbalosti s následným dopadem na přírodu je možno pozorovat stále.

Úprava vodního režimu je nejen na výsypkách finančně náročná. Spočívá zejména ve vhodné přípravě podkladu a modelaci terénu při sypaní samotné výsypky. Správně zvolené drenážní prvky se s ohledem k hmotnosti výsypky navrhnou jako odvodňovací systém z ocelového děrovaného potrubí o průměru nad 300 mm s obsypem kamenivem. Spoje potrubí jsou vždy navrženy jako pohyblivé, aby odvodnění mohlo respektovat sedání výsypky a nedošlo k přerušení potrubí. Používá se i kamenných drenáží bez potrubí, což umožňuje odvedení přebytečné vody do recipientů tak, aby odvodnění mělo trvalý a efektivní charakter a předešlo se destabilizaci terénu podpovrchovou vodou a erozí. Z výsypky je zapotřebí odvést vodu jen v množství představujícím možný potenciál pro obnovu ekosystému. Zde je potřeba počítat s fyzikálními vlastnostmi výsypkového substrátu, jeho homogenitou, popřípadě zvrstvením. Velmi důležitou vlastností substrátu je jeho propustnost pro vodu a vzduch a vhodné chemické složení z hlediska průběhu pedogeneze.

Je důležité brát na vědomí, že se půda na výsypkách utváří po dlouhou dobu a je poměrně těžké určit, jaké podloží je propustné a vhodné jak pro vztlínání, tak pro infiltraci vody. Podzemní voda se k povrchu dostává vlivem působení kapilárních sil a kořenovým systémem vegetace jako důsledek evapotranspirace. K utváření a přizpůsobení životního prostředí, jako je udržení příznivého půdního vodního režimu a vlhkosti, napomáhá zejména půdní biota, např. žížaly a další půdní mikroorganismy. Na plochách, které byly lesnický rekultivovány, je půdní prostředí ovlivněno zvoleným typem cílové dřeviny, který ovlivňuje půdu zejména kořeny a kvalitou opadu. Při zemědělské rekultivaci rozhoduje možné použití navážky úrodné ornice, popř. použití vápnění, navážky kompostu nebo kůry v kombinaci s vhodnou agrotechnikou a opakováním, ale i využití jiných technik.

Zvládne-li se technicky provedení výsypky, bude třeba se vypořádat se všudypřítomným problémem – důlními vodami. Ty jsou podle zákona č. 44/1988 Sb., *o ochraně a využití nerostného bohatství*, charakterizovány jako „...vody podzemní, povrchové a srážkové, které vnikly do hlubinných nebo povrchových důlních prostorů bez ohledu na to, zda se tak stalo průsakem nebo gravitací z nadloží, podloží nebo boku nebo prostým vtékáním srážkové vody, a to až do jejich spojení s jinými stálými povrchovými nebo podzemními vodami“.

Po chemické stránce představují důlní vody nebezpečí v důsledku zvýšeného vnosu nežádoucích cizorodých rozpuštěných látek (zejména Fe a Mn) z vyluhovaných hornin do podzemních vod, a tím způsobeného ohrožení současného i budoucího stavu přírody. Takové vody bývají jímány, čerpány, čištěny a na základě vydaných povolení vypouštěny v určitém množství do vodotečí. V některých případech jsou důlní vody nadále využívány, a to zejména k léčebným účelům. Například Darkovská sůl je stále užívána v místních lázních a je též možné si ji zakoupit. Pro zajímavost: sůl z Darkova se vyrábí zahušťováním a odpařováním jodobromové solanky, která je z geologického hlediska mořskou vodou z období třetihor doprovázející uhelná ložiska. Protože se solanka těží ze značné hloubky (až 600 m), je zcela zbavena antropogenního znečištění.

Vodu povrchovou máme na výsypkách možnost, stejně jako jinde v přírodě, určitým způsobem regulovat, jinak je to však s vodou podpovrchovou. Na výsypkách bývá podzemní voda ve větších hloubkách, popř. zde nacházíme několik kolektorů podzemní vody jako důsledek zvrstvení. Tak, jak si celý výsypkový kolos v průběhu času sedá, vytlačuje podzemní vodu na povrch. Zde se nemusí jednat jen o podzemní vodu, ale též o vodu srážkovou, která v důsledku minimální propustnosti povrchu výsypky zůstává na povrchu. Na řadě míst mohou takto vznikat, většinou u paty výsypky a v úžlabí, zamokřené stanoviště. Leckdy se jedná až o menší jezírka o délce několika metrů, která budí dojem přirozené mozaikovitosti a dávají možnost uchycení běžné, ale i vzácné a ohrožené bioty, jako je např. vláknitá sinice (*Dichothrix ledereri*), krásnoočko (*Euglena mutabilis*), čolek velký (*Triturus cristatus*) a mnoho dalších. V průběhu času dochází k napojení takto vzniklých ploch na okolní toky a zapojení do širšího hydrologického cyklu a jen málokdo by poznal, že nejde o původní vodní plochy.

Je více než jasné, že tvorba nových ekosystémů na úkor současné přírody představuje citelné narušení, které přináší řadu starostí. Především změny hydrologických vlastností krajiny přesahují rámec pouze lokálního ovlivnění. Ve většině případů se ovlivnění týká celého regionu, někdy i s přesahem přes hranice států. Je však jasné, že i přes všechny tyto možné problémy a postupně, zprvu ne příliš patrné změny znamená úspěšné obnovení vodního režimu ambiciózní šanci přiblížit se v budoucnu stavu, který zde byl dříve.

**Mgr. Jiří Cejpek, doc. Ing. Mgr. Jan Frouz, CSc.
Přírodovědecká fakulta UK v Praze**

Publikace z oblasti hydrologie vydané VÚV TGM v posledním období

Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadu klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR

Magdalena Mrkvíčková a kol.

Praha: VÚV TGM, 2012, 133 s., ISBN 978-80-87402-25-2

Existují v podstatě dva základní přístupy, jak je možné reagovat na skutečnost, že vývoj množství skleníkových plynů v atmosféře s největší pravděpodobností způsobuje globální změnu klimatu. První z nich vede cestou odstraňování vlastní příčiny problému. Druhý představuje proces adaptace na dopady klimatické změny nebo též přizpůsobení se.

Cílem publikace je vytvořit jeden z prvních metodických dokumentů, který by představoval podpůrný nástroj pro organizace, jež považují problematiku adaptace na dopady klimatické změny za prioritní a chtějí optimálně využívat dostupné finanční zdroje a přispívat tak k procesu adaptace. Popsané metodické postupy jsou zaměřeny na opatření, která řeší otázku změny v dlouhodobé hydrologické bilanci a změny v rozdělení jednotlivých složek hydrologické bilance v ročním chodu a respektují řídicí principy uvedené v doporučujícím dokumentu Evropské komise, jenž vznikl v rámci Společné implementační strategie Rámcové směrnice pro vodní politiku (River Basin Management in Changing Climate, Guidance No. 24).

Publikace vychází z projektu *Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky*, který byl řešen ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v.v.i., v letech 2008–2012. Cílem projektu bylo navrhnout a na pilotních aplikacích ověřit postupy pro návrh efektivních adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny na

vodní zdroje v ČR. Projekt byl zaměřen především na technická opatření na vodohospodářské infrastruktuře.

Simulation games on flood operational management: a tool for the integrated strategy of flood control

Marta Martínková a kol.

Praha: VÚV TGM, 2012, 70 s., ISBN 978-80-87402-18-4

Publikace se zabývá možnostmi využití simulačních her ve vodním hospodářství. Hlavním tématem je hodnocení dispečerské simulační hry, která se odehrála 11. listopadu 2008 na půdě státního podniku Povodí Ohře. Celá akce byla realizována v rámci projektu EU NeWater v případové studii Labe. Hlavními organizátory byly Povodí Ohře, státní podnik, VÚV TGM v Praze a ČHMÚ Praha a Ústí nad Labem.

Cílem této dispečerské simulační hry bylo ukázat značné nejistoty a někdy neúplnosti vstupních informací pro rozhodování často v časové tísní a zdůraznit potřebu vzájemného porozumění a úzké spolupráce všech zúčastněných odborníků a institucí během skutečné povodňové situace.

Simulační hra byla hodnocena z vodohospodářského a sociologického hlediska, přičemž vodohospodářské hodnocení spočívalo v porovnání výsledků všech týmů, včetně ukázky reakce na dostupné hydrologické předpovědi ve vybraných profilech a nádržích, cílem sociologického hodnocení bylo především získat zpětnou vazbu od účastníků hry i pozorovatelů, zjistit postoje a očekávání členů hráčských skupin, zhodnotit přínosy dispečerské simulace a poskytnout doporučení pro příští opakování dispečerské simulační hry.

Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulačních schopností v povodí Rakovnického potoka

Stanislav Horáček, Ladislav Kašpárek a kol.

Praha: VÚV TGM, 2011, 164 s., ISBN 978-80-87402-14-6

Z pozorování meteorologických veličin (zejména teploty vzduchu) vyplývá, že na území České republiky dochází v několika posledních desetiletích ke změně klimatu. Proto je stále větší důraz kladen na hledání efektivních možností, jak její dopady eliminovat či omezit. Platí to zejména pro odvětví, která jsou klimatem a jeho vývojem bezprostředně ovlivněna. Mezi ně patří významné sektory vodního hospodářství a zemědělství.

V rámci České republiky byl vzestup teploty vzduchu, který se již projevil na celém jejím území, v procesu hydrologické bilance na většině území doprovázen mírným zvětšením srážek, které postačily dotovat zvýšený výpar, a odtok z povodí se nezmenšoval. Na území Středočeského kraje však srážky spíše klesaly. Ze 12 let z období 1998–2009 byly jen ve dvou letech roční úhrny nad normálem. Ve většině let oblast s podprůměrnými srážkami zasahuje i část Ústeckého kraje, zejména dolní část povodí Ohře. Jedná se o území charakterizované nejmenšími dlouhodobými úhrny srážek v Čechách. Výsledky z vodoměrných pozorování na povodích ležících v této oblasti pak ukazují výrazně klesající trend průtoků až do hodnot blízkých nule. Jedním z takových případů je povodí Rakovnického potoka, kde při posudku zabezpečení bilančního stavu (v daném profilu Rakovník jde o zachování minimálního průtoku) je již současný stav charakterizován jako pasivní, tj. nevyhovující požadavkům ČSN 75 2405.

V letech 2009–2011 byl proto řešen projekt *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulačních schopností v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt)*, na němž se podílely Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., a Česká zemědělská univerzita v Praze. Meteorologická a hydrologická data poskytl Český hydrometeorologický ústav. Získané poznatky a zkušenosti byly využity jako podklad k sestavení metodiky pro tvorbu opatření směřujících primárně ke zvýšení akumulační schopnosti

povodí a zabezpečujících požadavky na užívání vody. Metodika je uvedena v kapitole 2, kromě možnosti zvýšení akumulace vody se zabývá i dalšími aspekty, které souvisejí se zlepšením hydrologických poměrů a vodohospodářské bilance povodí.

Pilotní studie Rakovnického potoka je obsahem kapitoly 3. Ta obsahuje řadu dílčích částí, které zahrnují komplexní popis povodí, analýzu trendů meteorologických a hydrologických veličin a odhad jejich dalšího vývoje, zpřesnění znalostí o plošné a časové proměnlivosti hydrologických veličin, analýzu příčin současných dopadů klimatické změny, zpřesnění znalostí o extrémních povodních a posouzení různých typů adaptačních opatření (agrotechnické změny v povodí, akumulační nádrže, převody vody). Na základě posouzení jejich účinnosti pro zvětšení akumulační i retenční schopnosti byly podrobněji navrženy varianty akumulačních nádrží i agrotechnické úpravy v povodí. Jejich návrh je zpracován jako samostatný mapový materiál. Vzhledem k tomu, že v povodí Rakovnického potoka jsou využívány převážně podzemní vody, byla velká pozornost věnována zpřesnění znalostí o prostorovém i časovém rozložení hladiny podzemní vody, zpřesnění odhadů přírodních zásob podzemní vody i vztahům podzemní vody a průtoků říční sítě. V závěru studie jsou stručně shrnuty základní výsledky výzkumu a doporučena prioritní adaptační opatření.

Odhad dopadu klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření

Martin Hanel, Ladislav Kašpárek, Magdalena Mrkvičková a kol.

Praha, VÚV TGM, 2021, 108 s., ISBN 978-80-87402-22-1

Problematika změny klimatu je již řadu let v popředí společenského zájmu. Přestože existují názory zpochybňující projekce (negativních) dopadů antropogenní činnosti na podnebí, obecně uznávaná odborná literatura se víceméně shoduje na tom, že klimatický systém může být lidskou činností ovlivněn a že podle dlouhodobých odhadů vývoje a vlivu lidské společnosti na klima mohou být dopady této činnosti značně negativní, minimálně v některých oblastech či ve vztahu k vybraným aspektům lidské existence.

Z těchto důvodů v současné době v Evropě i v České republice kontinuálně probíhá výzkum zaměřený na zpřesňování odhadu možných dopadů klimatické změny na podnebí a hydrologický režim. Tyto odhady jsou dále vstupem do modelů simulujících vliv změny klimatu na různé socio-ekonomické sektory. V posledních letech byl výzkum změny klimatu v České republice, kromě výzkumu změn samotných hydrometeorologických veličin, zaměřen i na návrh možných adaptačních opatření, metodiku posouzení jejich efektivity a rovněž byly provedeny konkrétní studie návrhu adaptačních opatření v lokalitách již změnou klimatu postižených.

Monografie shrnuje výsledky pětiletého řešení projektu *Zpřesnění dosavadních odhadů dopadu klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření*. Práce dále navazuje na předchozí výsledky modelování dopadu změny klimatu, které probíhá ve VÚV TGM již řadu let.

Monografie je rozdělena do tří částí. První se věnuje přiblížení podstaty modelování klimatu, zaměřuje se na nejistoty s ním spojené a metody jejich kvantifikace. Dále přibližuje probíhající změny klimatu a podrobně popisuje výsledky modelování dopadu změny klimatu na hydrologický režim v České republice během 21. století. Druhá část je zaměřena na výběr adaptačních opatření, zejména vzhledem k jejich potenciální účinnosti pro zmírnění dopadu extrémních srážek a sucha. Jednotlivá adaptační opatření jsou posouzena pomocí jednoduchých metod a navíc jsou shrnuty poznatky experimentálních studií dokládající jejich účinnost. Monografie je uzavřena souborem případových studií řešených ve VÚV TGM, jež se týkají tématu adaptací na klimatickou změnu, popřípadě modelování dopadu změny klimatu obecně.



**VODOHOSPODÁŘSKÉ
TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE**

Water Management Technical and Economical Information

Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti vodního hospodářství

Redakční rada: RNDr. D. Baudišová, Ph.D., Ing. Š. Blažková, DrSc., Ing. P. Bouška, Ph.D., prof. Ing. A. Grünwald, CSc., doc. Ing. A. Havlík, CSc., prof. Ing. P. Pitter, DrSc., prof. RNDr. A. Sládečková, CSc., prof. Ing. J. Zezulák, DrSc.

Ročník 55

**ISSN 0322 - 8916
MK ČR 6365**



**Výzkumný ústav vodohospodářský
T. G. Masaryka, v.v.i.
Podbabská 30
160 00 Praha 6
IČO 00020711**

Kontakt: Mgr. S. Garciova
tel.: 220 197 282, e-mail: garciova@vuv.cz