

Srážko-odtokový model pro dlouhodobé prognózy v podmínkách klimatické změny

Rainfall-runoff model for long-term prognosis under climate change

Kateřina Knoppová^{1,2}, Daniel Marton²

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 2578/43, 616 67 Brno¹;

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, Veverčí
331/9, 602 00 Brno²*

Abstrakt

Cílem příspěvku je představit koncepční srážko-odtokový model Runoff Prophet, který umožňuje simulaci průtoků v podmínkách změny klimatu v závěrovém profilu libovolného povodí. V rámci článku byla provedena praktická aplikace vyvinutého softwaru na povodí řeky Svratky nad vodním dílem Vír I. Získané výsledky byly vyhodnoceny z hlediska charakteru predikovaných teplot, srážek a průtoků v měrném profilu Dalečín, představujícím přítok do nádrže. Runoff Prophet se během testování prokázal jako účinný nástroj k modelování srážko-odtokového procesu pro účely dlouhodobých prognóz. Své uplatnění v praxi může nalézt například při předpovídání změn hydrologické bilance krajiny nebo při odhadu budoucích zásob vody ve vodních nádržích, a to jak při posouzení těch stávajících, tak při návrhu nových.

Klíčová slova: Runoff Prophet, hydrologické modelování, klimatický scénář, Nash-Sutcliffe

Abstract

The aim of this paper is to present the conceptual rainfall-runoff model Runoff Prophet, which is eligible to simulate discharge under climate change in a closing profile of any river basin. Within the paper, developed software was tested on Svratka river catchment above Vir I. dam. Results were evaluated from viewpoints of predicted air temperature, precipitation and discharge characteristics in Dalecin stream gauging station, representing the reservoir inflow. During practical application, Runoff Prophet proved itself as an effective tool for rainfall-runoff process modelling with long-term prognosis purposes. In practice, it could be used for example for predictions of changes in hydrological balance of the landscape or for estimations of future water supplies in reservoirs when assessing the current ones as well as designing the new ones.

Keywords: Runoff Prophet, hydrological modelling, climate scenario, Nash-Sutcliffe

Úvod

V současné době zaznamenáváme na našem území prokazatelné změny klimatu, které se budou výhledově pravděpodobně dále prohlubovat [1]. Protože klima je silně provázáno s hydrologickým režimem krajiny, snaha popsat důsledky jeho změn má ve vodním hospodářství své nepopiratelné místo. Potvrzuje to i Národní akční plán adaptace na změnu klimatu Ministerstva životního prostředí z roku 2015 [2], který vychází z Národní politiky výzkumu, vývoje a inovací na léta 2016-2020. Z jeho doporučení vyplývá, že bádání v oblasti globálních změn by se mělo mimo jiné soustředit na výzkum a modelování dopadů změny klimatu na vodní režim, ekosystémy a agroekosystémy a získané výsledky by měly být důsledně promítány do příslušných strategií na národní i mezinárodní úrovni.

Predikce hydrologické situace (potažmo průtoku) je možná pouze tehdy, pokud jsme schopni popsat fungování srážko-odtokového procesu v povodí. Proces transformace srážky na odtok je ovlivňován řadou faktorů od velikosti a topografie povodí, typu hydrografické sítě, geologie a půdních vlastností, využití území, až po charakter srážek, nasycení povodí a teplotní poměry. Jedná se o velmi složitý přírodní koloběh a nalézt vztahy mezi meteorologickými daty a odtokem není jednoduché.

Nástroji, které dokáží tento proces simulovat, jsou srážko-odtokové modely. Díky nim máme možnost na základě informací o meteorologických prvcích a vlastnostech povodí predikovat příslušné hydrologické veličiny v různě vzdálené budoucnosti. Velké důvěře se těší modely, založené na co nejpodrobnějším popisu charakteristik povodí, který je velmi komplikovaný a náročný na čas (modely HEC-HMS, SAC-SMA, HYDROG, SWAT, TOPMODEL a mnoho dalších). Odlišný přístup mají koncepční a empirické modely, kde povodí popsáno být nemusí a software pouze hledá vztah mezi příčinou a následkem na základě kalibračních řad vstupních veličin. Takovým modelem je i Runoff Prophet, vyvinutý v rámci diplomové práce autorky v roce 2017 [3].

V dnešní době studuje hrozící změny meteorologických i krajinných prvků velká komunita vědců. Jednou z organizací, zabývajících se změnou klimatu, je IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). Ta mimo jiné definuje klimatické scénáře, vyjadřující různé směry možného vývoje budoucího klimatu. Konkrétní meteorologická data jsou získávána pomocí propracovaných globálních klimatických modelů (GCM). Takové modely mají poměrně hrubé rozlišení, a proto se pro další využití provádí downscaling, a to například pomocí tzv. generátorů počasí. Získaná data můžeme použít i jako vstupy do hydrologických modelů

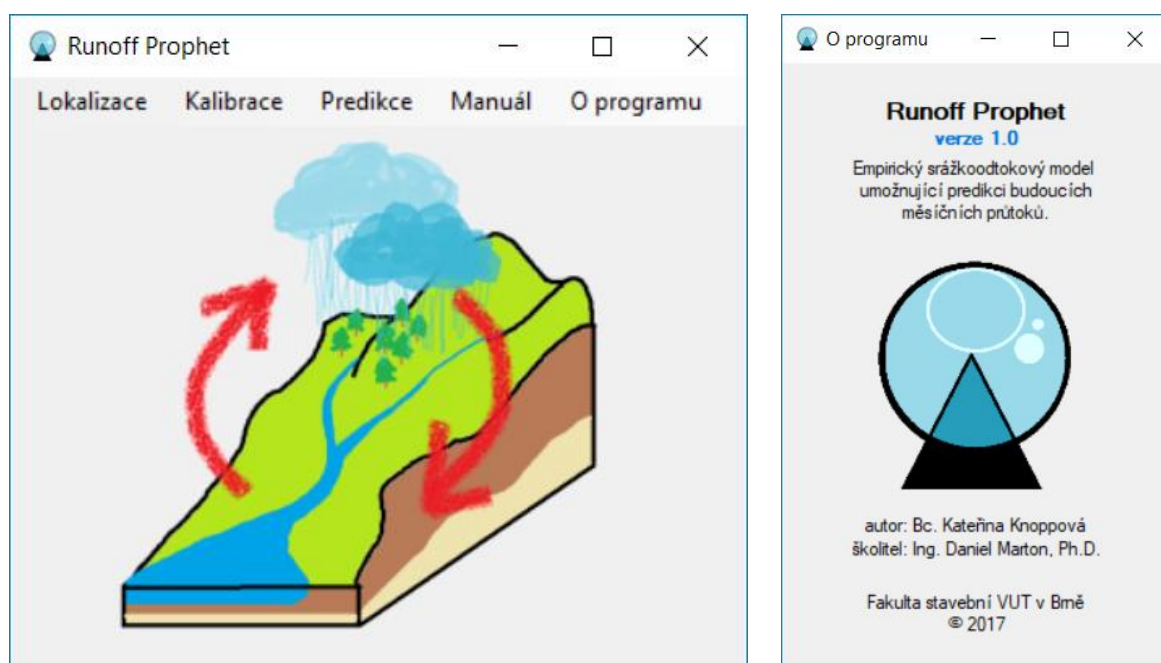
a získat tak informace o eventuálních směrech vývoje vodní bilance krajiny v budoucích obdobích.

Díky modelování srážko-odtokového procesu můžeme nejen odhadnout budoucí průtoky ve vodních tocích, ale například i určit předpokládané změny úrovně hladiny v konkrétních vodních nádržích, upravovat návrhy objemů nádrží s ohledem na budoucí klima nebo posoudit objemy stávající.

Cílem článku je představit odborné veřejnosti software Runoff Prophet a otestovat jej na zájmovém povodí. Vyhodnoceny budou nejprve vstupní predikované teploty a srážky a následně průtoky, simulované pro budoucí období.

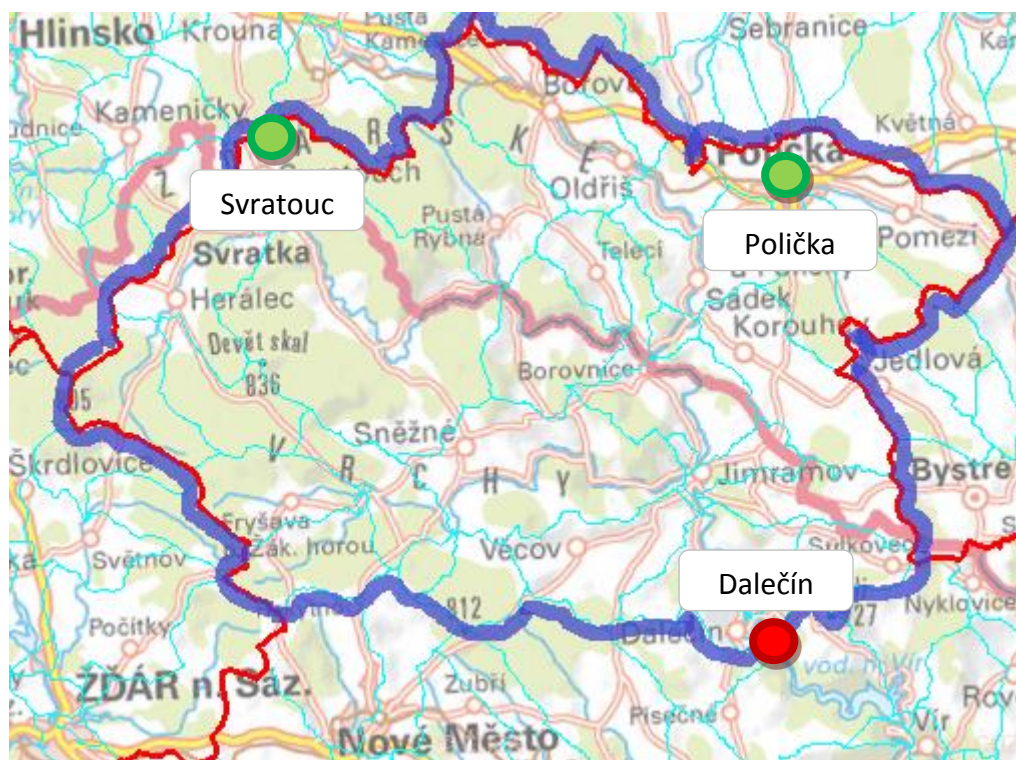
Materiál a metody

Runoff Prophet je srážko-odtokový model, umožňující simulaci průtoků v závěrovém profilu zájmového povodí (Obr. 1). Nejprve je model na základě měřených meteorologických a hydrologických dat nakalibrován, poté je možné s využitím predikovaných meteorologických dat modelovat budoucí průtok. Dle klasifikace modelů podle WMO [4] se dá Runoff Prophet zařadit mezi modely, které je možné použít ve výzkumu a v budoucnu i pro návrhovou činnost v oblasti vodního hospodářství. Simuluje komplexní systém povodí a z hydrologických jevů zohledňuje vlhkost půdy, evapotranspiraci, průtok podzemní vody a průtok v korytě s časovým krokem větším než 1 den. Jedná se o deterministický koncepční lumped model s měsíčním krokem výpočtu.



Obr. 1 Software Runoff Prophet

Software je založen na jednoduchých bilančních srážko-odtokových rovnicích [5], které obsahují několik kalibračních koeficientů. K jejich optimalizaci je využívána upravená metoda diferenciální evoluce s koeficientem účinnosti modelu Nash-Sutcliffe (NS) jako kalibračním kritériem. Program se skládá ze tří základních výpočetních bloků – Lokalizace, Kalibrace a Predikce. Celému výpočtu předchází vložení vstupních dat uživatelem, a to jak pro kalibraci, tak pro predikci. Jedná se o meteorologická a hydrologická data vztažená k zájmovému povodí, konkrétně o řady průměrné měsíční teploty, měsíčního úhrnu srážek a průměrných měsíčních průtoků. Pro sledované povodí musí být nejprve provedena lokalizace, tedy udání jeho plochy a polohy využitých meteorologických stanic. Následně je zvolen jeden ze dvou implementovaných způsobů výpočtu evapotranspirace (Thornthwaite nebo Blaney-Criddle) a poté je možné přejít k samotné kalibraci, jejíž úspěšnost je určena hodnotou kritéria NS. Po nakalibrování modelu přichází na řadu predikce na základě vložených budoucích meteorologických dat. Jednou z mnoha možností jak je získat je statistický downscaling prostřednictvím generátoru počasí LARS-WG [6]. Ten na základě charakteristik vložených měřených meteorologických dat generuje řady pro budoucí období podle implementovaných scénářů vývoje klimatu.



Obr. 2 Zájmové povodí

V rámci článku je prezentována praktická aplikace softwaru Runoff Prophet na povodí nad vodní nádrží Vír I. (část povodí III. řádu 4-15-01 Svatka po Svitavu), končící závěrovým profilem Dalečín (viz Obr. 2). Toto povodí bylo zvoleno zejména z důvodů případné

možnosti použít výsledné řady průtoků k výpočtům budoucích hladin v nádrži. Povodí bylo shledáno vyhovujícím i z hlediska své přiměřené velikosti a faktu, že průtoky ve zdejších vodních tocích jsou neovlivněné manipulacemi na nádržích. Plocha zájmového povodí je 366,94 km².

Cílem aplikace bylo určení průměrných měsíčních průtoků v profilu Dalečín ve vzdálené budoucnosti podle klimatického scénáře A1B (AR4 IPCC) z modelu HadCM3, implementovaného v generátoru počasí LARS-WG. Jako způsob výpočtu evapotranspirace, vstupující do srážko-odtokových rovnic, byla na základě předběžné analýzy výsledků kalibrace zvolena rovnice Thornthwaite.

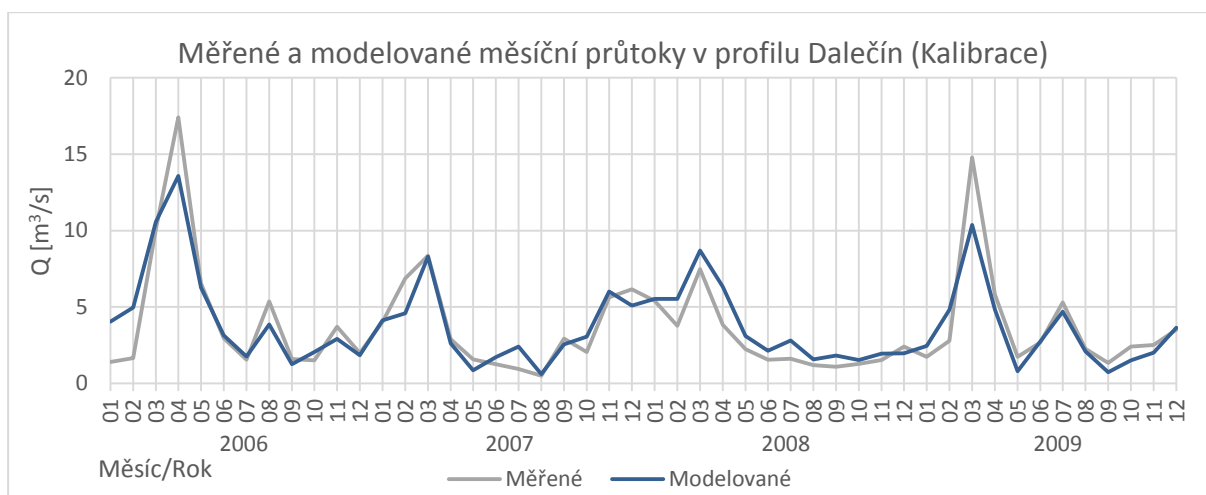
Soubor vstupních dat pro kalibraci byl poskytnut ČHMÚ a obsahoval řadu průměrných měsíčních průtoků v profilu Dalečín, měsíční teploty ze stanice Svratouch a průměrného úhrnu srážek ze stanic Svratouch a Polička. Vhodná délka kalibrační a validační řady byla zvolena na základě předběžné analýzy výsledků kritéria NS kalibrace modelu. Vybrána byla 45letá řada pro kalibraci (leden 1972 až prosinec 2016) a 15letá pro validaci (leden 1957 až prosinec 1971). Poměr kalibračního a validačního souboru dat byl tedy 3:1.

Vstupními daty pro predikci průtoků v profilu Dalečín byla řada průměrné měsíční teploty a měsíčního úhrnu srážek, získaná použitím LARS-WG. Řada je rozdělená na 4 části, kde první úsek (Baseline) představuje současné období s délkou 45 let. Členění dalších částí je následující: I. období mezi lety 2011-2030, nazvané též jako blízká budoucnost, II. období 2046-2065, čili střední budoucnost, a III. období zastupující vzdálenou budoucnost mezi lety 2080-2099.

Výsledkem predikce prostřednictvím Runoff Prophet byly řady průměrných měsíčních průtoků pro Baseline, období I, II a III. Pro správnou interpretaci výsledků bylo nutné provést u výsledných dat korekci na Baseline. Byla použita jednoduchá metoda, využívající k opravě dat poměr mezi průměrným dlouhodobým průtokem řady reálné a syntetické. Analogickým procesem prošly před interpretací i predikované měsíční řady teploty a úhrnů srážek.

Výsledky

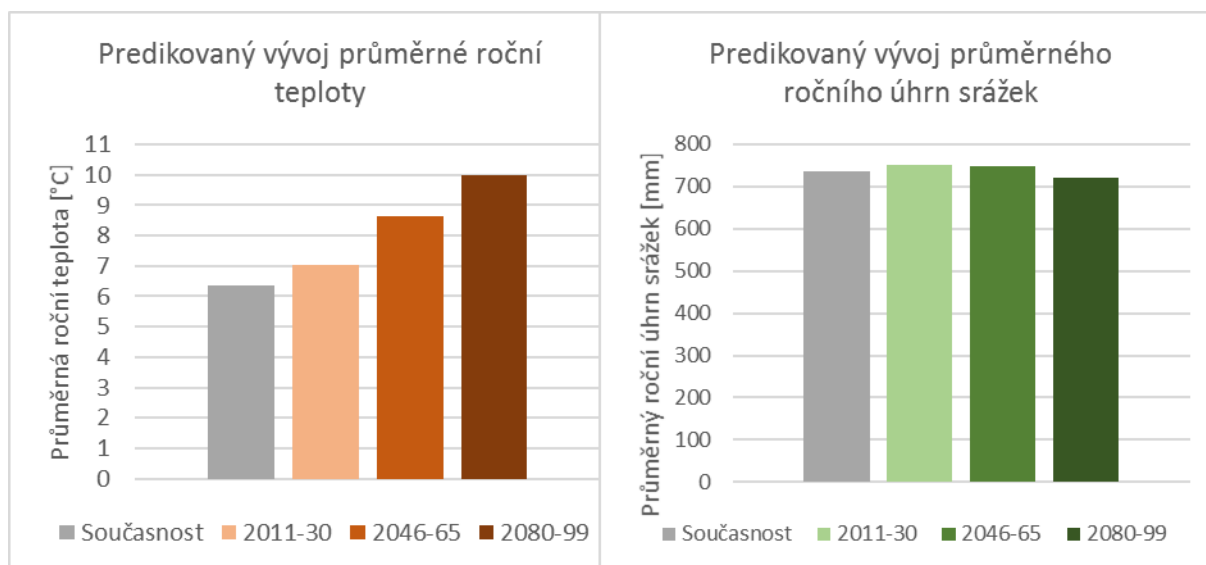
Koeficient Nash-Sutcliffe dosáhl při kalibraci hodnoty 0,705, což odpovídá dobré účinnosti



Obr. 3 Měřené a modelované průtoky v profilu Dalečín (Kalibrace)

modelu [7]. Na Obr. 3 vidíme výřez srovnání měřené řady průtoků v profilu Dalečín a řady získané po kalibraci. Při validaci bylo dosaženo hodnoty NS 0,52 a je tedy možné prohlásit, že model uspokojivě vystihuje srážko-odtokový proces v zájmovém povodí [7].

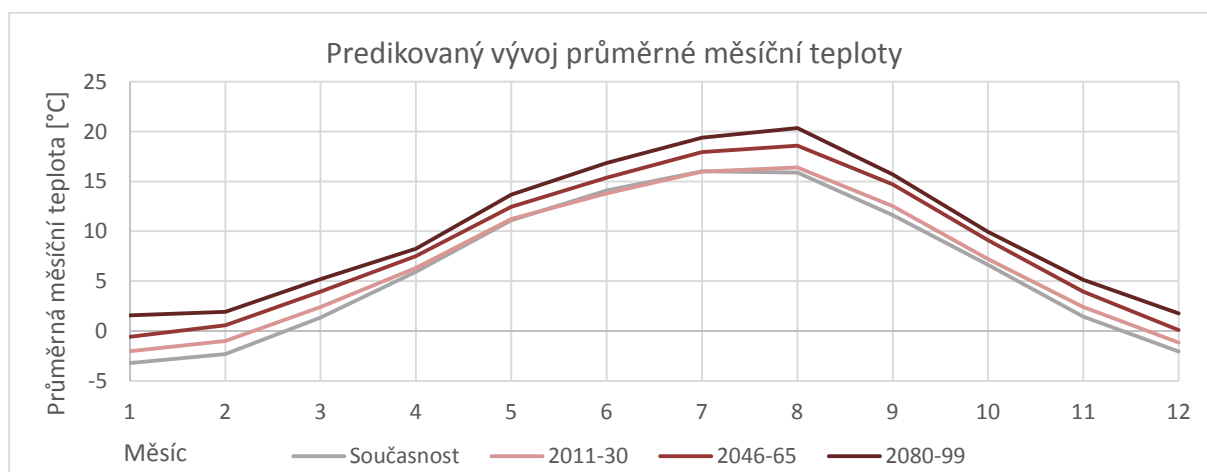
Pro účely ucelené interpretace výsledků byla nejprve vyhodnocena predikovaná meteorologická data z programu LARS WG. Pro každé období byla vypočítána průměrná roční teplota vzduchu a průměrný roční úhrn srážek, které vidíme na Obr. 4. Vyhodnocena byla také průměrná teplota a úhrn srážek pro jednotlivé měsíce v roce.



Obr. 4 Predikovaný vývoj průměrné teploty a průměrného ročního úhrn srážek v povodí Víru I.

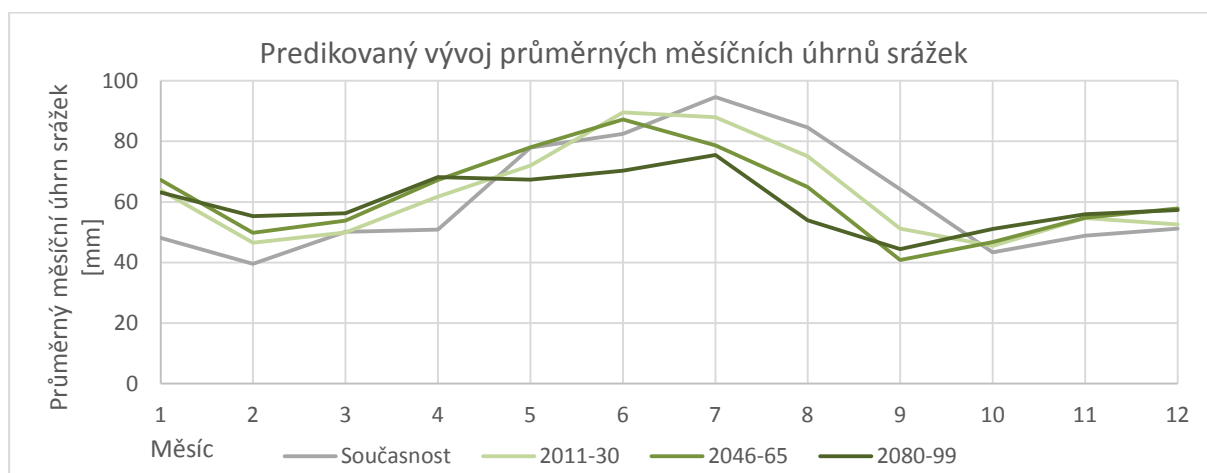
V současné době, kterou reprezentuje kalibrační řada, je průměrná roční teplota vzduchu na území zájmového povodí 6,4 °C. V období I dojde podle scénáře A1B k jejímu zvýšení na 7 °C. V období II už bude dosahovat 8,6 °C a v III. období 10 °C. Do roku 2099 tedy teplota vzduchu stoupne o 3,6 °C. Na Obr. 5 vidíme, že chod teploty v roce zůstane v budoucnu téměř stejný jako dnes, ale postupně se posune k vyšším hodnotám. V zimních

měsících se průměrná měsíční teplota dostane z hodnot záporných do hodnot kladných. Největší nárůst zaznamenáme v měsíci lednu, a to o 4,8 °C oproti současnosti.



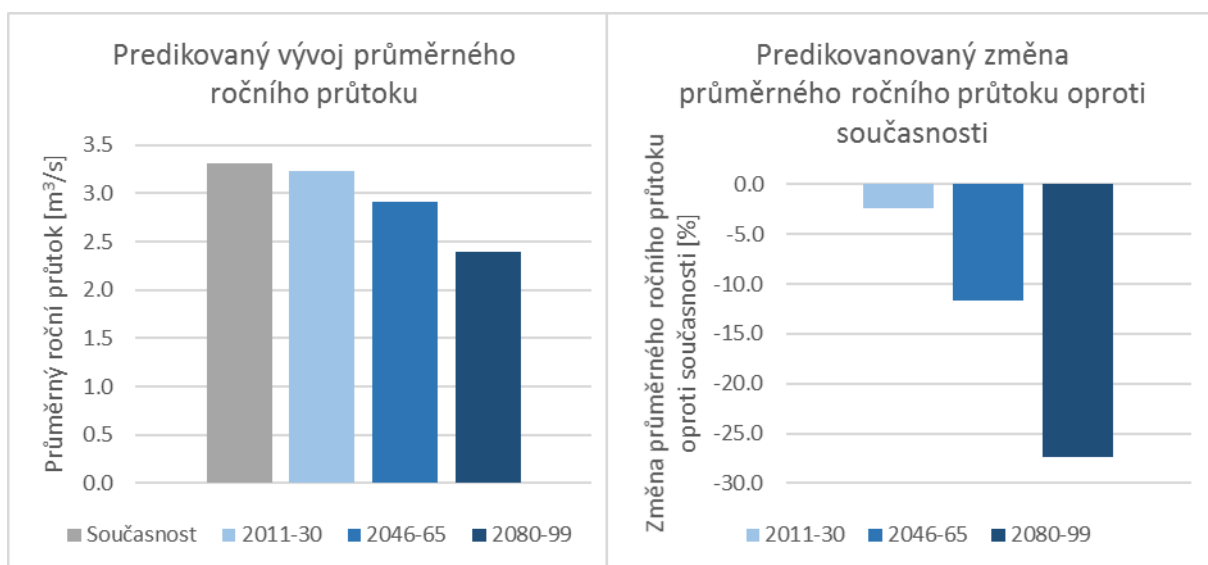
Obr. 5 Predikovaný vývoj průměrné měsíční teploty v povodí Víru I.

Na Obr. 4 vidíme, že průměrný roční úhrn srážek na zájmovém území bude v budoucích obdobích téměř konstantní. V současnosti odpovídá 735,9 mm/rok. V budoucnu bude rozdíl oproti tomuto úhrnu kolísat v řádu 1-3 %. Ze srovnání průměrných úhrnů srážek pro jednotlivé měsíce v roce na Obr. 6 je patrné, že v podle scénáře A1B bude docházet k postupnému rovnoměrnějšímu rozdělení srážek během roku. K nejvýraznějšímu nárůstu dojde v období III v měsíci únoru, a to o 39,9 % (15,8 mm) oproti současnosti. Největší pokles nastane v srpnu, a to o 36,3 % (30,7 mm).



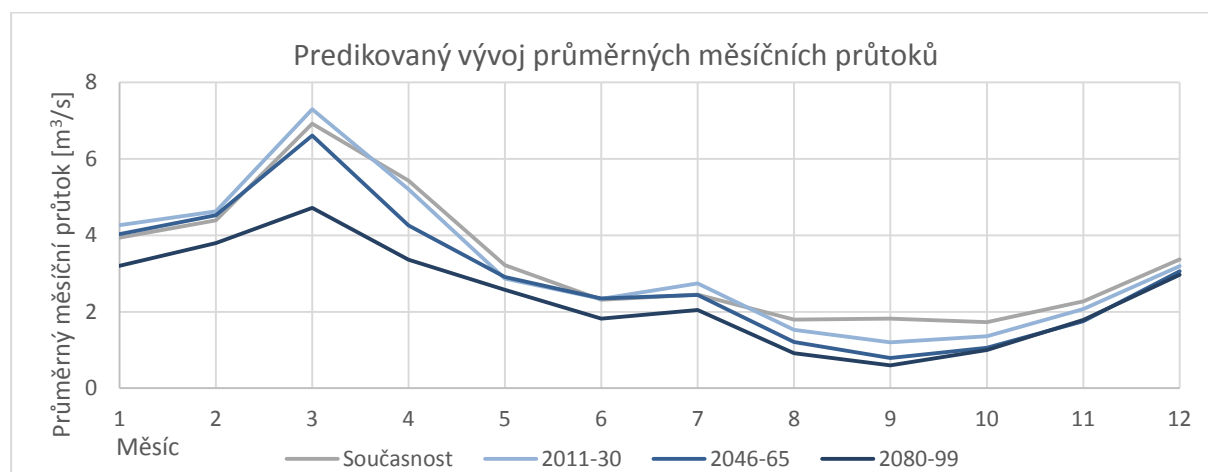
Obr. 6 Predikovaný vývoj průměrných měsíčních úhrnů srážek v povodí Víru I.

Řady budoucích průtoků v měrném profilu Dalečín, predikované pomocí softwaru Runoff Prophet, byly vyhodnoceny z hlediska průměrného ročního průtoku a průměrných měsíčních průtoků.



Obr. 7 Predikovaný vývoj průměrného ročního průtoku v měrném profilu Dalečín a jeho změny oproti současnosti

Průměrný roční průtok bude mít v budoucnu jasný klesající trend. Na Obr. 7 vidíme, že ze současných 3,3 m³/s klesne na 2,4 m³/s, což odpovídá změně o 27,4 % .



Obr. 8 Predikovaný vývoj průměrných měsíčních průtoků v měrném profilu Dalečín

Z Obr. 8 je patrné, že v I. období bude rozložení průměrného měsíčního průtoku v rámci roku téměř stejné jako v současné době. V některých měsících dojde k mírnému nárůstu, výrazný pokles nastane pouze na podzim. Ve střednědobé budoucnosti dochází oproti období předchozímu ke snížení ve všech měsících. Ve vzdálené budoucnosti je už rozdíl oproti současným průměrným průtokům ve všech měsících jasně patrný. Jde o výrazný pokles, a to od 12,1 % (prosinec) až do 66,9 % (září) oproti současnosti.

Diskuze

Protože vstupní data pro predikci byla získána generátorem počasí, který byl v rámci článku použit jako black-box, bylo zapotřebí nejprve prověřit jejich důvěryhodnost a porovnat je s výsledky jiných studií. Z výstupů LARS-WG vyplývá, že do roku 2099 dojde na ploše

povodí ke zvýšení průměrné roční teploty vzduchu o 3,6 °C, tedy na 10 °C. Tento výsledek odpovídá očekávané teplotě ve stejném období pro scénář se středními emisemi CO₂, prezentované Ústavem výzkumu globální změny AV ČR v.v.i. [1], tj. na území zájmového povodí 9,1-11 °C [1]. IPCC uvádí v hodnotící zprávě AR4 rozmezí nárůstu globální teploty pro období 2080-2099 dle scénáře A1B mezi 1,7 a 4,4 °C [8], čemuž data v tomto článku odpovídají. Vyhodnocena byla také průměrná teplota v jednotlivých měsících. Chod teploty během roku zůstává v budoucnu téměř totožný jako v současné době, posouvá se ale k vyšším hodnotám. Do roku 2099 nezůstane v žádném ze zimních měsíců průměrná teplota v záporných číslech a průměrné letní teploty se vyšplhají až na 20,4 °C (srpen). Předpoklad kladné průměrné měsíční teploty pro území ČR ve všech měsících v roce potvrzují i výsledky projektu VaV na zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny [9].

Součástí predikovaných meteorologických dat byly i řady budoucích srážek. Průměrný roční úhrn v zájmovém povodí bude v budoucnu téměř stejný jako v současnosti; v jednotlivých obdobích bude rozdíl kolísat mezi 1-2 %. Výsledky projektu VaV ukazují kolísání jeho rozdílu oproti období 1961-1990 mezi 0-3,5 % [9] pro celou ČR, oproti čemuž nejsou závěry článku významně rozdílné. CzechGlobe na svém portálu o klimatické změně udává průměrný roční úhrn srážek na zájmovém povodí ve III. období 701-800 mm [1], čemuž výsledky praktické aplikace (736 mm) odpovídají. Zkoumáno bylo i budoucí rozložení srážek v roce, kde se závěry jednotlivých studií často rozcházejí. Výsledky této práce ukazují na nárůst úhrnu srážek na jaře a v zimě a pokles v létě a na podzim. Údaje z knihy kolektivu autorů z VÚV [10] oproti tomu říkají, že na podzim bude průměrný úhrn srážek narůstat. Průměrný úhrn srážek v létě, predikovaný v rámci článku pro III. období (213 mm) se shoduje s údaji na portále Klimatická změna [1].

Zjednodušeně lze tedy říci, že meteorologická data, získaná pomocí LARS-WG odpovídají výsledkům jiných studií, co se týče teploty vzduchu. V rámci srážek data odpovídají z hlediska ročních úhrnů, v podzimních měsících ale dochází ve srovnání s výsledky z jiných vědeckých prací k podhodnocování.

Z analýzy řad průtoků, simulovaných pomocí programu Runoff Prophet pro měrný profil Dalečín, vyplývá, že do roku 2099 dojde dle scénáře A1B ke snížení průměrného ročního průtoku o 27 %. Výstupy z modelu Bilan [9] ukazují, že odtok na zájmovém území se do roku 2099 sníží o 10 až 30 % oproti referenčnímu období. Výsledky praktické aplikace se s těmito závěry shodují.

V rámci předpovídaných dat bylo zkoumáno také rozdělení průměrných měsíčních průtoků v roce. Ve III. období dojde ke snížení průměrného průtoku ve všech měsících,

a to od 12 % (prosinec) do 70 % (září) oproti současným hodnotám. Poměrné rozložení (podíl ročního průtoku) během roku zůstává podobné jako dnes, rozdíl v jednotlivých měsících je $\pm 2,5$ % oproti současnosti. Je třeba brát v úvahu, že vzhledem k možnému podhodnocování podzimních srážek mohou být i výsledné průtoky mírně podhodnocené.

Vliv predikované změny klimatu na hydrologickou situaci v zájmovém povodí můžeme shrnout následovně. Bylo zjištěno, že průměrný roční úhrn srážek zůstane podobný jako v současné době a během roku bude rozložen rovnoměrněji než dnes. Když nebudeme brát v úvahu počet dnů se srážkami a bez nich, výsledky mohou vyznívat tak, že jejich vliv na vláhovou bilanci krajiny bude spíše pozitivní. Při vyhodnocení je ale třeba brát v úvahu i další predikované ukazatele. Průměrná roční teplota vzduchu se do roku 2099 zvýší o $3,6$ °C. Významné je mimo jiné i zvýšení průměrné teploty v zimních měsících na téměř 2 °C. Z těchto hodnot můžeme usuzovat, že dojde k výraznému nárůstu výparu, a tedy i k rychlejšímu úbytku vody z povodí. Vzhledem ke zvýšení teploty v zimních měsících bude zřejmě také omezeno doplňování zásob podzemní vody z pomalého tání sněhové pokrývky. Na základě obou předpovídaných meteorologických prvků lze předpokládat, že vliv změny klimatu na hydrologickou bilanci bude spíše negativní. Tento předpoklad potvrzují výsledky aplikace softwaru Runoff Prophet, podle kterých dojde ke snížení průměrného ročního průtoku o téměř 30 %. Pokud predikované průtoky porovnáme se současnou hranicí sucha v profilu Dalečín, vidíme nárůst průměrného počtu měsíců v roce s průtokem pod ní z 0,2 na 1,69. V současné době tedy nastává takto nízký průměrný měsíční průtok v průměru jednou za pět let, v budoucnu to bude více než jednou ročně.

Software Runoff Prophet byl během praktické aplikace otestován s dobrým výsledkem. Nabízí se jeho srovnání s o poznání složitějším koncepčním modelem Bilan Výzkumného ústavu vodohospodářského. V časopise VTEI byl zveřejněn článek [11], vyhodnocující mimo jiné kalibraci modelu Bilan na 53 povodích z Generelu LAPV. Úspěšnost kalibrace byla určena kritériem Nash-Sutcliffe, jehož hodnoty se nacházely v intervalu od 0,03 do 0,75. Průměrná hodnota NS byla rovna 0,48, 50 % povodí bylo nakalibrováno s hodnotami mezi 0,38-0,59, u 25 % povodí byl v intervalu 0,59-0,75. Při aplikaci softwaru Runoff Prophet na zájmovém povodí bylo při kalibraci dosaženo hodnoty NS 0,71, což odpovídá horní hranici výsledků dosažených pomocí Bilanu. Aby však bylo možné tyto dva softwary prokazatelně porovnat, bylo by nutné provést rozsáhlé testování Runoff Prophet na mnoha povodích.

Zjednodušujícím předpokladem práce s Runoff Prophet je, že nezohledňuje budoucí změny ve fungování srážko-odtokového procesu v povodí. Nepočítá například se změnami

vegetačního pokryvu, plochy zástavby v povodí, land use a dalšími. Model je nakalibrován na „průměrné“ charakteristiky povodí za minulé období a s těmito charakteristikami počítá i do budoucna. Na tuto skutečnost je třeba myslet při interpretaci výsledků.

Program Runoff Prophet bude dále vyvíjen a zdokonalován. Bude také provedeno jeho testování na větším počtu vybraných povodí a zavedení nejistot, vyplývajících z použití nástrojů pro predikci klimatu.

Závěr

V příspěvku byl představen software Runoff Prophet, koncepční srážko-odtokový model, umožňující dlouhodobé prognózy průtoků v podmínkách změny klimatu. Na povodí nad nádrží Vír I. bylo provedeno jednoduché zhodnocení budoucích meteorologických charakteristik a s využitím představeného programu také průtoků. Z výsledků vyplývá, že na zájmovém území dojde do roku 2099 k významnému oteplení, průměrný roční úhrn srážek zůstane podobný jako dnes, ale dlouhodobý průměrný průtok v profilu Dalečín poklesne o téměř 30 %. Runoff Prophet se během testování prokázal jako účinný nástroj k modelování srážko-odtokového procesu s dobrými výsledky při kalibraci. S jeho pomocí lze poměrně jednoduchým a rychlým způsobem vyhodnocovat dlouhodobé hydrologické bilance nebo odhadovat budoucí zásoby vody ve vodních nádržích, a to bez nutnosti náročného popisu vlastností povodí. Další výhodou modelu je jeho otevřenost v požadavcích na vstupní meteorologická data pro predikci. Ta mohou být získána libovolnou metodou, ať už downscalingem z globálních klimatických modelů, použitím modelu regionálního nebo třeba vytvořením vlastního scénáře vývoje počasí.

Literatura

- [1] *Klimatická změna* [online]. Brno: Ústav výzkumu globální změny AV ČR v.v.i. (CzechGlobe), 2018 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.klimatickazmena.cz>
- [2] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu: Implementační dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR* [online]. MŽP, 2015 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OE-OK-NAP_text_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OE-OK-NAP_text_20170127.pdf)
- [3] KNOPPOVÁ, Kateřina. *Srážko-odtokový proces v podmínkách klimatické změny*. Brno, 2018. 60 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

- [4] NEMEC, J. *Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales*. Lelystad: Secretariaat CHR/KHR, 1993. ISBN 9070980169.
- [5] WANG, G. Q., J. Y. ZHANG, Y. Q. XUAN et al. Simulating the Impact of Climate Change on Runoff in a Typical River Catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrometeorology* [online]. 2013 [cit. 2018-01-02]. DOI: 0.1007/s00704-015-1467-1. ISSN 1525-7541. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM-D-12-081.1>
- [6] SEMENOV, Mikhail A. a Elaine M. BARROW. *LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies: Developed by Mikhail A. Semenov - Version 3.0 - User Manual* [online]. Rothamsted Research, 2002 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://resources.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/groups/mas-models/download/LARS-WG-Manual.pdf>
- [7] MORIASI, Daniel N., Jeffrey G. ARNOLD, Michael W VAN LIEW, R. Daren HARMEL a Tamie L. VEITH. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* [online]. American society of agricultural and biological engineers, 2007, 50(3), 16 s. [cit. 2018-01-02]. ISSN 0001–2351. Dostupné z: <http://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeval.pdf>
- [8] *Climate Change 2007: Synthesis Report: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. 2007 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- [9] *Projekt VaV – SP/1a6/108/07 Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření: TECHNICKÉ SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ PROJEKTU 2007–2011* [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav_TECHNICKE_SHRNU TI_2011.pdf
- [10] HANEL, Martin, Ladislav KAŠPÁREK a Magdalena MRKVIČKOVÁ. *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2011. ISBN 978-80-87402-22-1.
- [11] MÁCA, P., BAŠTA, P., KOŽÍN, R. a M. HANEL. Využití geomorfologických charakteristik pro odhad celkové retence povodí. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2016, 58(6) str. 54–57. ISSN 0322-8916

Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován v rámci specifického výzkumu FAST-S-18-5341 „ Propagace nejistot změny klimatu v hydrologických a vodohospodářských aplikacích“.

Kontakt:

Ing. Kateřina Knoppová

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

Kroftova 2578/43, Brno

katerina.knoppova@chmi.cz

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny

Veveří 331/9, Brno

knoppova.k@fce.vutbr.cz