

HODNOTENIE SIMULÁCIÍ A PREDPOVEDÍ HYDROLOGICKÝCH MODELOV V OPERATÍVNEJ HYDROLÓGII SHMÚ

HANA HLAVÁČIKOVÁ, KATEŘINA HRUŠKOVÁ, MARCEL ZVOLENSKÝ, DANICA LEŠKOVÁ

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Operational hydrological forecasts are important pieces of information for different users. They are based on simulations of hydrological models, in SHMÚ operational hydrology mainly on the HBV and HEC-HMS rainfall-runoff models. Hydrological forecasts involve various uncertainties that are little known and are not often separately quantified. Therefore, there is effort to develop a new methodology for evaluating forecasts and simulations, which may help with their elimination. This paper provides information on the assessment method of hydrological forecasts and simulations of SHMÚ. Some examples of this assessment from several Slovak gauging stations and catchment areas are included as well. Regular and comprehensive evaluation of hydrological models should lead, in particular, to specific recommendations on improving the calibration of hydrological models, sending feedback to colleagues in Numerical Meteorology or Remote Sensing Departments of SHMÚ who are responsible for the preparation of precipitation input data (predicted or measured).

Operatívne hydrologické predpovede sú dôležitou informáciou pre rôznych užívateľov. Sú založené na simuláciách hydrologických modelov, v operatívnej hydrológii SHMÚ predovšetkým zrážkovo-odtokových modelov HBV a HEC-HMS. Hydrologické predpovede v sebe zahŕňajú rôzne neistoty, ktoré sú málo známe a často nie sú oddelene kvantifikované. Preto je snahou vyvíjať adekvátnu metodiku hodnotenia hydrologických predpovedí, ktorá by dokázala vyjadriť jednotlivé druhy neistôt, čo by mohlo pomôcť k ich eliminácii. Tento príspevok poskytuje informáciu o spôsobe hodnotenia hydrologických predpovedí a hydrologických modelov v operatívnej hydrológii SHMÚ, ako aj niektoré ukážky hodnotenia pre rok 2020 z niekoľkých slovenských vodomerných staníc a povodí. Pravidelné a komplexné hodnotenie hydrologických modelov by malo viesť predovšetkým ku konkrétnym odporúčaniam týkajúcich sa zlepšenia kalibrácie hydrologických modelov, zasielaniu spätnej väzby pre Odbor Numerické predpovedné modely a metódy a Odbor Dištančné merania SHMÚ, ktoré poskytujú údaje o meraných a predpovedaných zrážkach a pracujú na zvyšovaní kvality týchto údajov.

Key words: hydrological forecasts, radar, ALADIN, warnings, HBV model

ÚVOD

Operatívne hydrologické predpovede prinášajú informáciu o možnom vývoji hydrologickej situácie, v dôsledku čoho sú súčasťou procesu rozhodovania pri rôznych celospoločenských aktivitách. Sú dôležité napr. pre správcu vodných tokov a povodí, pre elektrárne pri plánovaní manipulácií na vodnom diele pri výrobe elektrickej energie, pre riečnu plavbu a v neposlednom rade pre protipovodňovú ochranu miest a obcí (Alfieri et al., 2014; Hrušková et al., 2019; Lopez et al., 2021; Unduche et al., 2018).

Operatívne hydrologické predpovede vychádzajú zo simulácií hydrologických modelov, ktoré boli nakalibrované na fyzicko-geografické podmienky konkrétneho povodia a daného záverového profilu. V operatívnej hydrológii SHMÚ sa používajú zrážkovo-odtokové (ZO) modely HBV a HEC-HMS pre 118 predpovedných vodomerných profilov, pričom na webovej stránke SHMÚ sú uverejňované deterministické predpovede vodných stavov pre 76 vodomerných profilov na 48 hodín (Obr. 1).

Hydrologické modely majú široké uplatnenie pri riešení rôznych úloh v oblasti základného a aplikovaného výskumu. Najznámejšie je modelovanie dopadov rôznych hypotetických scenárov, napr. zmeny využitia krajiny, dopadov klimatickej zmeny, vplyv extrémnych zrážok na

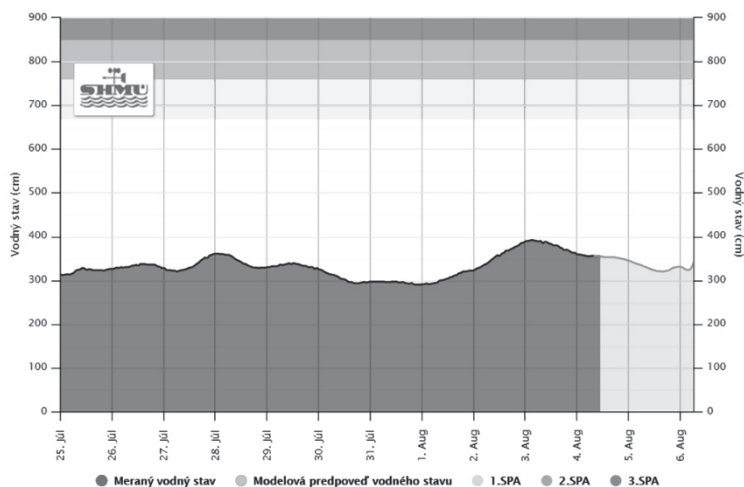
odtok v povodí (Danáčová et al., 2020; Hlavčová et al., 2016; Slezciak et al., 2018). Možno ich používať aj v ne-monitorovaných povodiach, kde môžu zastupovať časovo náročné a niekedy aj finančne nákladné merania. Na druhej strane sa používajú na testovanie poznatkov získaných z priamych meraní v povodiach (Krajčí et al., 2016; Széles et al., 2021). Ich použitie v operatívnej hydrológii má svoje špecifiká. V operatívnej prevádzke SHMÚ sú tieto špecifiká nasledovné: modely sú nastavené v hodinovom časovom kroku, v nepretržitej prevádzke (24/7) zbiehajú niekoľkokrát za deň (v závislosti od vstupného meteorologického modelu – ALADIN, ECMWF, deterministická alebo pravdepodobnostná verzia). Poskytujú predpoveď prietoku, resp. vodného stavu s rôznou dobou predstihu.

Vzhľadom na mimoriadnu zložitost' hydrologických procesov a limitované vedomosti pri ich popise sú výstupy hydrologických modelov zaťažené neistotou, ktorá pochádza najmä z chýb vstupných údajov, štruktúry modelu a jeho parametrov (Liu, Gupta, 2007). Znamená to, že neistota je neoddeliteľnou súčasťou každej hydrologickej predpovede.

Vo všeobecnosti možno povedať, že hydrologické modelovanie ovplyvňujú štyri hlavné zdroje neistôt (Renard et al., 2009): i) neistota vstupov, napr. chyby meraných alebo predpovedaných meteorologických prvkov (teplota vzduchu, atmosférické zrážky); ii) neistota výstupov, napr.

Obrazok 1. Ukážka predpovede vodného stavu pre vybraný predpovedný profil Devín.

Figure 1. Example of water level forecast for selected gauging station Devín.



chyby mernej krivky ovplyvňujúce odhad odtoku; iii) štruktúrna neistota hydrologického modelu (niekedy označovaná ako „neistota modelu“), vyplývajúca zo zjednodušeného vyjadrenia hydrologických procesov v hydrologických modeloch; a (iv) parametrická neistota, ktorá odráža nemožnosť presne stanoviť hodnoty parametrov modelu v dôsledku výberu kalibračného obdobia (dĺžka a jeho charakter), neistôt obsiahnutých v kalibračných údajoch, nedokonalého porozumenia hydrologických procesov, aproximácie modelu atď. Pri tvorbe hydrologických predpovedí k nej ešte možno pridať neistotu operatívnu, ktorá súvisí s konaním a rozhodovaním hydrologa prognostika.

Na to, aby bolo možné s neistotami účinne pracovať a informovať o nich, je dôležité pochopiť, odkiaľ pochádzajú. Ako uvádza Renard et al. (2009), zníženie celkovej predpovednej neistoty vyžaduje dôkladné kvantitatívne pochopenie každého z jej zdrojov. Situáciu v operatívnej prevádzke značne ovplyvňuje aj fakt, že hydrologické modely pracujú s kvalitatívne odlišnými vstupnými informáciami, aj keď ide o rovnaký meteorologický prvok (atmosférické zrážky alebo teplota vzduchu). Napr. do modelu vstupujúce radarové odhady úhrnov atmosférických zrážok sa od tých predpovedaných líšia na základe zdroja, z ktorého informácia o nich pochádza. Skutočnosť, že hydrologické modely v operatívnej prevádzke sú kalibrované a trénované na radarových odhadoch zrážok, zatiaľ čo samotné hydrologické modelové predpovede sa opierajú o výstupy z meteorologických modelov, predstavuje významný zdroj neistôt bez ohľadu na jej ostatné zdroje.

V operatívnej hydrologii, a nielen v nej, tak vyvstávajú celkom zásadné otázky: je model zostavený pre dané povodie správny, dokáže dostatočne uspokojivo modelovať hydrologické procesy prebiehajúce na povodí, dokáže dostatočne dobre simulovať rôzne zrážkovo-odtokové situácie?

Od roku 2020 sme na Odbore Hydrologické predpovede a výstrahy SHMÚ pristúpili ku komplexnému hodnoteniu hydrologických modelov tak, aby sme postupne dokázali kvantifikovať a oddeliť jednotlivé druhy mode-

lových neistôt. To nám umožní lepšie poznať ich významné zdroje a zároveň aj generovať spätnú väzbu nevyhnutnú pre prípravu kvalitných meteorologických vstupov, meraných aj predpovedaných. Vo vzťahu ku konkrétnemu hydrologickému modelu sú taktiež identifikované povodia s väčšou alebo menšou mierou neistoty.

Cieľom tohto príspevku je oboznámiť odbornú verejnosť s metodikou hodnotenia simulácií a krátkodobých predpovedí hydrologických modelov používaných na Odbore Hydrologických predpovedí a výstrah SHMÚ. Jej účelom je identifikácia najvýznamnejších zdrojov neistôt pre konkrétny predpovedný profil a hydrologický model. Pre potreby spracovania tohto príspevku sme vybrali zrážkovo-odtokový model HBV.

METODIKA

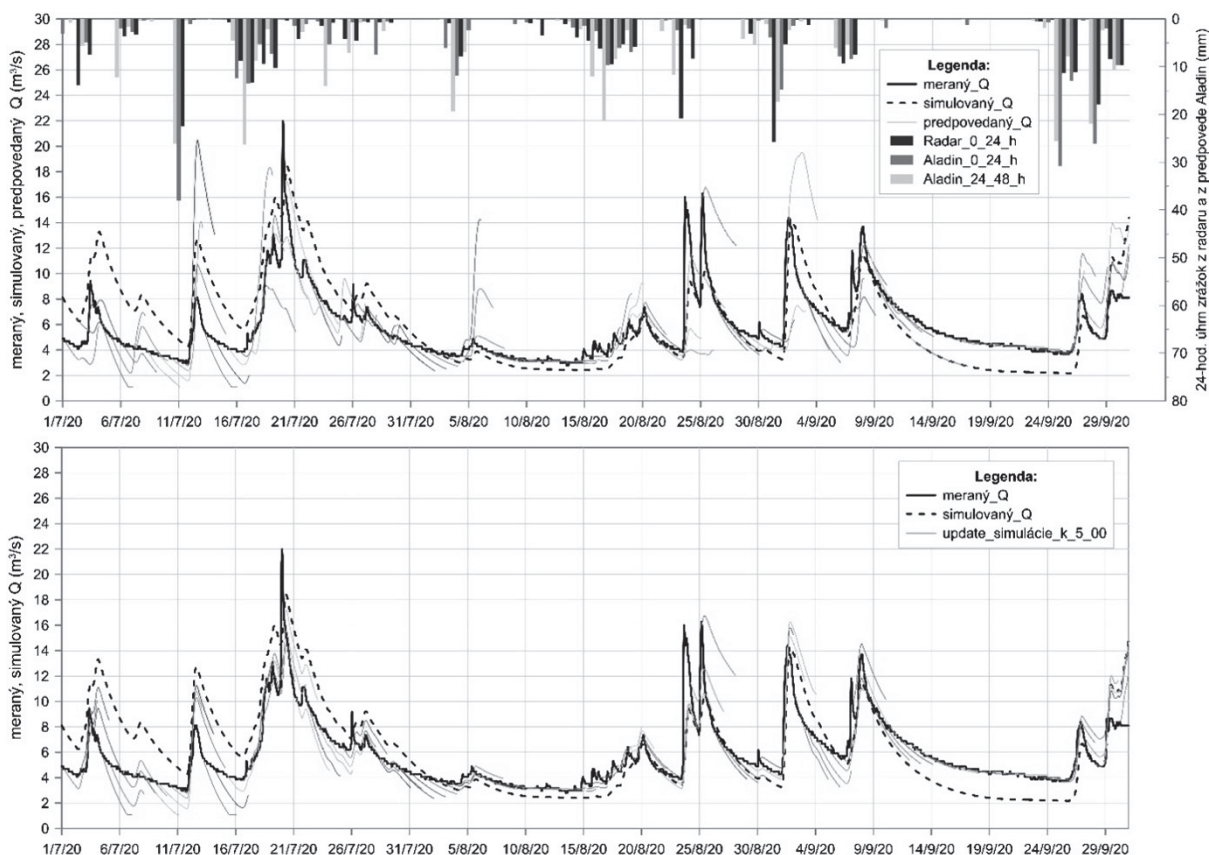
Hodnotenie hydrologických predpovedí a simulácií hydrologického modelu pre vybraný predpovedný profil sa skladá z niekoľkých častí. Cieľom bolo vytvoriť komplexnú metodiku hodnotenia, ktorá prebieha kvartálne na základe hodinových operatívnych údajov. Po ukončení roka sa niektoré charakteristiky posudzujú aj celoročne. Základnými vstupnými údajmi do hodnotenia sú merané, simulované a predpovedané prietoky v danom predpovednom profile. Údaje o spadnutých a predpovedaných atmosférických zrážkach a nameranej a predpovedanej teplote vzduchu sú spracované vo forme priemerov na povodie k záverovému profilu povodia – k hodnotenej stanici. V mesačnom kroku vstupujú do hodnotenia priemerné úhrny zrážok na povodie odvodené z klimatických máp priestorového rozloženia mesačných úhrnov zrážok, ktoré vytvára Odbor Klimatologická služba SHMÚ interpolačnou metódou 3D Spline. Klimatické mapy sú vytvorené na základe bodových údajov zo siete zrážkomerných staníc.

Dôležité je uvedomiť si rozdiel medzi predpovedanými a simulovanými prietokmi. Pri predpovediach hydrologického modelu vstupujú do modelu predpovede atmosférických zrážok a teploty vzduchu z meteorologického modelu ALADIN, čím vyjadrujú budúci, predpokladaný stav, na rozdiel od simulácií, do ktorých vstupujú reálne spadnuté zrážky a namerané teploty (odvodené z produktu INCA), vyjadrené ako priemerné hodnoty na povodia a predstavujú tak minulé až súčasný stav systému. Radarové odhady zrážok, ktoré sú prezentované v tejto práci a ďalej označované ako zrážky z radaru, sú zlúčenou informáciou založenou na analýze radiolokačných meraní kombinovaných s nameranými údajmi z pozemnej siete automatických zrážkomerných staníc (produkt qPrec).

Predpovedané prietoky, ktoré v modeli nadväzujú na simulované, sa vždy v hodine vydania predpovede (napr. ranné predpovede k 3:00 hod. UTC) aktualizujú na meraný prietok.

Obrázok 2. Merané, simulované a predpovedané prietoky (k 3:00 h UTC) a 24-hodinové úhrny zrážok z radaru a z predpovede Aladin na dnes (0–24 h) a na zajtra (24–48 h) (obr. hore), merané, simulované a updatované simulované prietoky (k 3:00 h UTC) (obr. dole) pre stanicu Spišské Vlachy – Hornád (VS 8430) pre obdobie 1. 7. – 30. 9. 2020.

Figure 2. Measured, simulated and forecasted discharges (as of 03:00 UTC) and 24-hour precipitation totals from radar and from Aladin forecast for today (0–24 h) and for tomorrow (24–48 h) (fig. top), measured, simulated and updated simulated discharges (as of 03:00 UTC) (fig. bottom) for the station Spišské Vlachy - Hornád for the period 1. 7. – 30. 9. 2020.



Samotné hodnotenie hydrologických modelov sa skladá z nasledovných krokov:

1) Hodnotenie hydrologických predpovedí

Hodnotenie zahŕňa grafické zhodnotenie predpovedí (Obr. 2) s dôrazom na predpovedanie stupňov povodňovej aktivity (SPA) a štatistické zhodnotenie predpovedí: počet termínovaných predpovedí v intervale prípustnej chyby, počet nadhodnotení/podhodnotení, relatívna chyba, koeficient variácie. V ročnom hodnotení sa vyhodnocujú aj štatistické metriky NSE (Nash-Sutcliffe) a KGE (Kling-Gupta) pre rozdiely medzi predpovedanými a meranými prietokmi pre jednotlivé hodiny doby predstihu predpovede (od 1 do 69 hodín). Prípustná chyba predpovede sa počíta na základe meraných hodinových prietokov z niekoľko-ročného obdobia. Je to interkvartilový rozsah súboru +/- smerodajná odchýlka súboru, čo predstavuje 68,7% hodnôt súboru.

Štatistická metrika predpovedí alebo simulácií sa vyjadruje pomocou Nash-Sutcliffe (NSE) alebo Kling-Gupta (KGE) koeficientov (Alfieri et al., 2014, Knoben et al., 2019):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_a(t) - Q_b(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_b(t) - \bar{Q}_b)^2}, \quad (1)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_b} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_a}{\mu_b} - 1\right)^2}. \quad (2)$$

Kde Q_a a Q_b sú v prípade štatistiky predpovedí predpovedaný a meraný prietok (alebo simulovaný a meraný prietok) analyzovaný pre každú hodinu doby predstihu predpovede zvlášť, pričom predpovedaný a simulovaný prietok je vždy updatovaný k rannému meranému prietoku v čase vydania predpovede. V prípade analýzy simulácií hydrologického modelu je to simulovaný a meraný prietok (m^3/s). r je lineárny korelačný koeficient a vyjadruje koreláciu medzi skúmanými súbormi údajov, σ_a , σ_b a μ_a , μ_b sú smerodajné odchýlky a priemerné hodnoty analyzovaných radov údajov. Hodnota $\sigma_a / \sigma_b = \alpha$ vyjadruje mieru odchýlky variability, $\mu_a / \mu_b = \beta$ vyjadruje chybu priemeru.

Porovnaním Obr. 2 (horný a dolný) je možné vidieť neistotu meteorologickej predpovede. Obr. 2 (hore) znázorňuje neistoty hydrologických predpovedí (so všetkými neistotami) tak, ako sú publikované operatívnou službou. Obr. 2 (dole) zahŕňa v sebe iba neistotu hydrologického modelu a radarových údajov o zrážkach. Grafické, ako aj štatistické zhodnotenie dáva hydroológovi prvú informáciu o rozdieloch medzi predpovedanými a meranými prietokmi

a ich významnosti. Zatiaľ však chýba informácia o tom, čo je zdrojom možnej neistoty.

2) Hodnotenie simulácií hydrologického modelu

Hodnotenie zahŕňa grafické zhodnotenie simulácií, ako aj hodnotenie vyjadrené štatistickou metrikou NSE a KGE. Analýza výsledkov umožňuje určiť neistoty spojené s hydrologickým modelom, t.j. neistoty meraných meteorologických a hydrologických vstupov, ale aj parametrov modelu. Napr. rozdiely medzi simulovanými a meranými prietokmi v mrazovom bezzážkovom období môžu detegovať existenciu ľadových úkazov. Ich vplyv sa prejaví vzdušným vodnej hladiny (vzostup vodných stavov), ktoré sa prostredníctvom mernej krivky preniesie aj do nereálneho vzostupu meraných prietokov (neistota hydrologických vstupov).

Z pohľadu operatívnej hydrológie je dôležité, akým spôsobom hydrologický model simuluje zrážkovodtokové udalosti. Zaujímá nás celkový tvar a časový priebeh simulovanej vlny – jej nástup, veľkosť a čas kulminácie, ako aj pokles. Nakoľko hodnotený hydrologický model HBV patrí do kategórie kontinuálnych bilančných modelov, počíta sa nepretržite v každom časovom kroku vodná bilancia. Každý časový krok tak predstavuje počiatočné podmienky pre ďalší modelový výpočet. Inými slovami simulácia v minulosti ovplyvňuje budúcu simuláciu, ako aj hydrologický predpoveď. Porovnanie simulovaného a meraného hydrogramu v nadväznosti na zrážkové udalosti hydrológovi ukáže, či prípadné chyby hydrologického modelu môžu byť spôsobené meteorologickými vstupmi (neistota meteorologických vstupov – údaje z radaru), alebo hodnotami parametrov modelu (parametrická neistota). Bližšie informácie o hydrologickom modeli HBV (IHMS – Integrated Hydrological Modelling System) je možné nájsť v publikácii Bergström, 1992.

3) Hodnotenie atmosférických zrážok a teplôt vzduchu

Hodnotenie zrážok pozostáva z porovnania mesačných klimatických, radarových a predpovedaných (z modelu ALADIN) úhrnov zrážok. Na jednej strane táto informácia poskytuje údaj o tom, či išlo o obdobie bohaté, alebo chudobné na zrážky (klimatický úhrn je vyjadrený aj v % normálu). Druhou dôležitou informáciou, ktorá môže indikovať isté nezrovnalosti, je určenie charakteru zrážok (frontálne vs. konvektívne).

Výstupom tejto časti hodnotenia sú aj mapy podielov radarových a klimatických mesačných úhrnov zrážok pre jednotlivé modelované povodia (teda zrážok, získaných nepriamou metódou z radaru a zrážok získaných priamou metódou z pozemných bodových meraní, zo siete zrážkomerných staníc). Je možné z nich identifikovať časovo-priestorový výskyt dobrej alebo horšej zhody medzi reálne spadnutými zrážkami a zrážkami získanými z radarového produktu. Ide o veľmi cennú informáciu, ktorá je spätne zasielaná na Odbor Dištančné merania pre získanie informácie o spoľahlivosti radarových údajov. Na tomto odbore je tak neustále zlepšovaný radarový zrážkový produkt, ktorý je vstupom do hydrologického modelu. Ak sú výrazné odlišnosti medzi radarovými a skutočne spadnutými zrážkami, prejaví sa to buď v nadhodnotení, alebo podhodnotení modelovej simulácie. To má priamy dopad nielen na

simuláciu modelu, ale aj na kalibráciu modelu v dlhšom časovom horizonte. Porovnanie predpovedaných zrážok (prípadne teplôt, čo je dôležité hlavne v období akumulácie alebo topenia sa snehu) s reálne spadnutými indikuje neistoty meteorologickej predpovede, ktorá priamo ovplyvňuje výsledok hydrologickej predpovede.

4) Celkové zhodnotenie hydrologického modelu

Z celoročného hodnotenia modelu, ako aj z validácií hydrologických modelov na období mimo kalibračného obdobia, je možné zhodnotiť, ktorý zdroj neistoty je považovaný za najväčší problém pre daný predpovedný vodomerný profil: či je to neistota radarových zrážok, neistota meteorologickej predpovede alebo je to neistota samotného hydrologického modelu a je potrebné zväziť jeho rekalkuláciu.

VÝSLEDKY

V tejto časti príspevku sú prezentované viaceré výsledky. Najprv je to zhodnotenie zrážkových pomerov v roku 2020, z ktorých sa odvíjala hydrologická situácia na tokoch. Potom je to ukážka výsledkov hodnotenia stanice Spišské Vlachy na toku Hornád, z ktorých vyplynuli aj určité závery a ďalšie odporúčania. Osobitnou časťou je ukážka hydrologických predpovedí regionálnych povodní v októbri 2020 v porovnaní s predpoveďami povodní, ktoré sa vyskytli na niektorých tokoch koncom decembra. V závere sú ukážky predpovedí zrážok, ktoré môžu byť v niektorých prípadoch veľmi nadhodnotené alebo podhodnotené. Problematickým obdobím je letné obdobie s prívalovými zrážkami, ich presná lokalizácia a úhrny sú ťažko predpovedateľné, čo sa samozrejme prenáša aj do možnosti, resp. nemožnosti správne spracovať tieto udalosti použitými hydrologickými modelmi.

Zrážkové pomery v roku 2020

Rok 2020 bol z pohľadu vodnosti slovenských tokov veľmi premenlivý a vyznačoval sa viacerými extrémami (viď napr. v Správe o povodniach za rok 2020). Spočiatku veľmi suché obdobie v apríli bolo vystriedané častejším výskytom búrok na celom území. Počas letných mesiacov sa tak postupne dopĺňali zásoby vody v povodiach. September sa vyznačoval vo viacerých povodiach dvomi epizodami zrážok (na začiatku a na konci mesiaca), ktoré spôsobili nasýtenie týchto povodí. To vytvorilo priaznivé podmienky pre výskyt povodní, ktoré zasiahli takmer všetky povodia v mesiaci október. V októbri boli zrážky sústredené prevažne do piatich dní mesiaca, ostatná časť mesiaca a aj mesiac november boli prakticky bez zrážok, alebo iba s nízkymi úhrnmi. Vyššie úhrny zrážok sa vyskytli až koncom decembra, čo na niektorých tokoch opäť spôsobilo povodne.

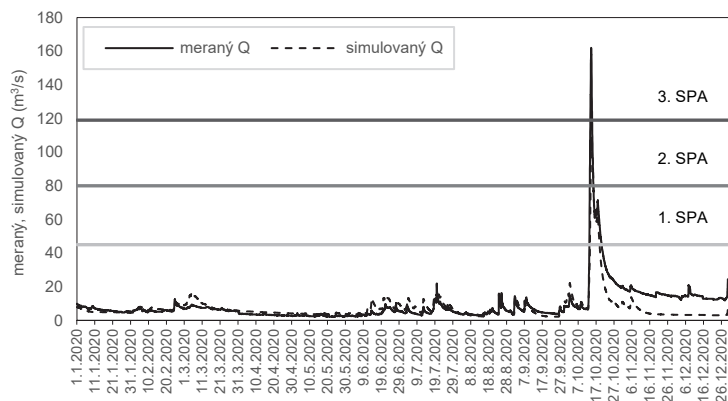
Hodnotenie vodomerného profilu Spišské Vlachy

Vodomerná stanica VS 8430 Spišské Vlachy sa nachádza na toku Hornád. Veľkosť povodia Hornádu po VS Spišské Vlachy je 775,02 km², dlhodobý priemerný ročný prietok je 5,27 m³/s.

Priebeh operatívnych meraných a simulovaných prietokov v roku 2020 je na Obr. 3. Počas poklesu povodňovej

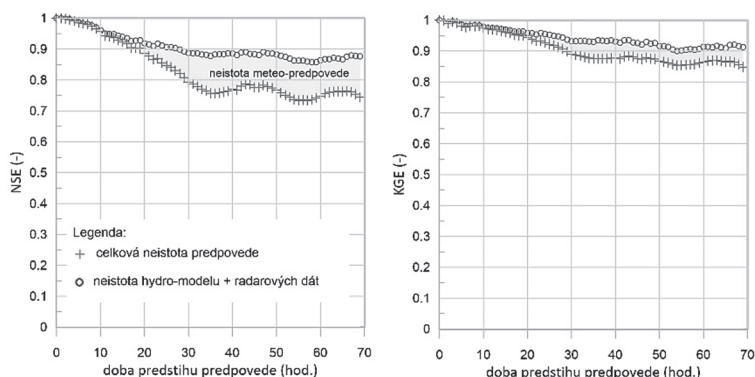
Obrázok 3. Merané a simulované prietoky pre vodomernú stanicu VS 8430 Spišské Vlachy na toku Hornád. Pre obdobie 1. 1. – 31. 12. 2020.

Figure 3. Measured and simulated discharges for the water gauging station Spišské Vlachy on the Hornád river. For the period 1. 1. – 31. 12. 2020.



Obrázok 4. Neistota hydrologických predpovedí vyjadrená pomocou štatistickej metriky NSE a KGE pre jednotlivé hodiny doby predstihu predpovede (1 až 69 hodín) pre stanicu 8430 Spišské Vlachy – Hornád, údaje sú z roku 2020. Rozdiel medzi celkovou neistotou hydrologických predpovedí a neistotou hydro-modelu a radarových dát je neistota meteo-predpovede.

Figure 4. Uncertainty of hydrological forecasts expressed by using NSE and KGE statistical metrics for individual forecast lead time hours (1 to 69 hours) for the station Spišské Vlachy – Hornád river, data are from the year 2020. The difference between the total uncertainty of hydrological forecasts and the uncertainty of the hydro-model and radar data is the uncertainty of the meteo-forecast.



vlny sa zmenil charakter odtoku, čo naznačuje rozdiel medzi meranými a simulovanými prietokmi. Uvedená situácia indikuje zmeny mernej krivky, čo sa potvrdilo po následnom vyhodnotení povodňovej situácie. Za normálnych okolností (bez zmeny koryta) by sa prietok po vlne vrátil na približne rovnakú úroveň ako pred vlnou podobne, ako ukazuje simulácia.

Percento termínovaných predpovedí s dobou predstihu 24 hodín sa pohybovalo v intervale 26 až 60 % prípustnej chyby, s dobou predstihu 48 hodín to bolo 20 až 51 %. Vyššie percentá boli dosiahnuté v období 2. kvartálu (apríl až máj) s nízkymi a ustálenými prietokmi. Štatistická metrika hodnotenia predpovedí je na Obr. 4. Je zaujímavé, že pre tento vodomerný profil hodnoty NSE aj KGE pre dobu predstihu od jednej hodiny po približne 31 až 37 hodín klesajú, potom sú už viac-menej ustálené. To znamená, že neistota predpovede v oboch prípadoch rastie

prvých 31 až 37 hodín, ale potom sa už významne nemení. Na základe Obr. 4, ktorý znázorňuje celkovú neistotu hydrologických predpovedí, neistotu hydrologického modelu a neistotu meteorologickej predpovede, je možné konštatovať, že neistota hydrologického modelu, ktorá zahŕňa v sebe aj neistotu radarových údajoch o zrážkach, je v prvých hodinách doby predstihu vyššia ako neistota meteorologickej predpovede. Narastá až do približne 30. hodiny doby predstihu, potom je viac-menej vyrovnaná. Z Obr. 4 je tiež vidieť, že neistota meteorologickej predpovede narastá v rozsahu 10. až 35. hodiny doby predstihu. Výsledky na Obr. 4 znázorňujú a zároveň kvantifikujú jednotlivé druhy neistôt, ktoré sa podieľajú na celkovej neistote hydrologických predpovedí, vydaných a analyzovaných pre stanicu Spišské Vlachy v roku 2020.

Hodnotenie predpovedaných stupňov povodňovej aktivity patrí medzi osobitne dôležité ukazovatele a je aj jedným z bodov cieľov kvality hydrologických predpovedí. Počas roka 2020 sa v tomto profile vyskytol SPA 1-krát (14. 10. 2021), ktorý bol aj predpovedaný. Táto povodňová udalosť bola predpovedaná už 11. 10. v rannej predpovedi a bola potvrdená aj predpoveďami z ďalších dní (12. 10. a 13. 10.). Jeden SPA bol počas roka predpovedaný, ale sa neuskutočnil (tzv. falošný alarm, 27. 6. 2021).

Mesačné úhrny predpovedí zrážok, vyjadrené ako priemerné úhrny na povodie, z modelu Aladin na 1. a 2. deň (s dobou predstihu 0–24 a 24–48 hodín) boli v mesiaci máj, jún a september nadhodnotené o 20 až 50 %, v mesiaci júl iba mierne podhodnotené o 10 %, pričom v auguste boli podhodnotené o 50 a 20 % (1. hodnota je pre predpoveď z modelu Aladin na 0–24 h, 2. hodnota pre predpoveď na 24–48 h). Predpoveď z dňa 26. 6. 2021 dávala falošný

alarm na 1. SPA kvôli nadhodnotenej predpovedi zrážok na povodie (denný úhrn zrážok 46,1 mm oproti reálne spadnutým 11,0 mm).

Mesačné úhrny zrážok z radaru, vyjadrené ako priemerné úhrny na povodie, sa pohybovali v rozsahu +/- 10 % mesačných úhrnov zrážok získaných z pozemných meraní zo zrážkomerných staníc (z klimatických máp). V mesiaci apríl bol tento podiel najnižší (0,7), čo poukazuje na 30%-né podhodnotenie zrážok z radaru, ale pri veľmi malom úhrne zrážok v tomto mesiaci (10 mm) mal takýto výsledok zanedbateľný vplyv na výsledky hydrologickej simulácie.

Štatistické zhodnotenie simulácií hydrologického modelu je v Tab. 1. Je vyjadrené pre hodnotený rok 2020, ako aj pre celé obdobie (august 2016 až december 2020) s dostupnými údajmi, predovšetkým zrážkovými z novej siete radarových meraní (kalibračné a validačné obdobie spolu). NSE aj KGE indikujú dobrú simuláciu modelu.

Avšak vždy je potrebné posúdiť model z pohľadu cieľa, pre ktorý sa používa. V operatívnej hydrologii je jeden z dôležitých cieľov, aby model dokázal dobre simulovať obdobia povodňových prietokov.

Tabuľka 1. Štatistické charakteristiky simulácie hydrologického modelu NSE a KGE (spolu s rozkladom jednotlivých členov tejto charakteristiky) získané pre uvedené obdobia.

Table 1. Statistical metrics of the NSE and KGE hydrological model simulations (together with the decomposition of the individual terms of the KGE metric) obtained for the indicated periods.

8430 Spišské Vlachy	NSE	KGE	<i>r</i>	α	β
1.1. – 31.12.2020	0,805	0,735	0,908	0,779	0,886
Obdobie 08/2016 – 12/2020	0,830	0,811	0,915	0,833	1,021

Na základe komplexného hodnotenia tohto vodomerneho profilu bolo zistených niekoľko skutočností. Najväčším zdrojom neistoty sa ukázali byť predpovedané zrážky prevažne v mesiacoch jún až september. Podľa štatistickej metriky aj podľa grafického zhodnotenia je hydrologický model dobre nakalibrovaný. Slabšou stránkou je simulácia maximálnych prietokov, ktorej je potrebné venovať sa samostatne. Hoci maximálny predpovedaný prietok v roku 2020 spadol do 2. stupňa PA, bol o 54 m³/s nižší ako reálny. Simulácia kulminácie bola o tretinu nižšia ako meraný prietok. V roku 2019 bol maximálny prietok simulovaný iba v polovičnej hodnote meraného. Odporúčame preto zvážiť samostatnú kalibráciu modelu pre obdobie vysokej vodnosti. V ostatnej časti roka sú simulácie veľmi dobré.

Štvrtý kvartál 2020 -

októbrové a decembrové povodne

Začiatkom októbra boli zaznamenané extrémne úhrny z trvalých zrážok. Na väčšine územia Slovenska mesačné úhrny zrážok zodpovedali 250 až 400 % normálu (1961 – 1990) (Bulletin meteorológia a klimatológia SHMU, 2020), čo spôsobilo povodne na viacerých tokoch. Zrážky boli pomerne rovnomerne priestorovo rozmiestnené v rámci povodí a padali niekoľko dní vo vyrovnanej intenzite. Z analýz predpovedí zrážok, z radarových úhrnov zrážok a z hydrologických predpovedí prietokov pre toto obdobie môžeme konštatovať, že všetky zložky vstupov do modelov odrážali reálnu situáciu a hydrologické predpovede boli v dobrej zhode s meranými prietokmi. Predstih hydrologických predpovedí bol dostupný až na 3 dni vopred. Viaceré modely signalizovali, že na tokoch budú dosiahnuté a prekročené stupne povodňovej aktivity. Podrobná analýza synoptického situácie, ako aj výskytu povodní z tohto obdobia je v niekoľkých správach o povodniach (Povodňová situácia na tokoch v povodí Nitry a dolného Váhu v októbri 2020, Povodne z trvalého dažďa v povodí Hrona, Ipl'a, Slanej a Rimavy v októbri 2020, Povodňová situácia na východnom Slovensku v októbri 2020, Povodňová situácia na tokoch v povodí horného a stredného Váhu v októbri 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy, 30.08.2021). Na Obr. 5 sú zobrazené mesačné úhrny zrážok pre mesiace september až december 2020.

Na viacerých stanicích modely indikovali dosiahnutie SPA už tri dni vopred (Obr. 6). Na základe takejto informácie bolo možné vydávať výstrahy na povodne z trvalého dažďa s dostatočne dlhou dobou predstihu. Modely sú v takýchto situáciách veľmi užitočným a potrebným nástrojom pre vydávanie výstrah. Niektoré predpovede boli potvrdené aj predpoveďami z európskeho povodňového výstražného systému EFAS (dostupné na: https://www.efas.eu/efas_frontend/#/home). Obr. 6 poskytuje ukážku výstupov hydrologických predpovedí v takom formáte, ako boli aktuálne dostupné na webových stránkach hydrologickej operatívnej služby, a ktoré v sebe obsahujú všetky spomínané druhy neistôt.

Podhodnotené zrážky z radaru aj predpovede zrážok koncom decembra 2020

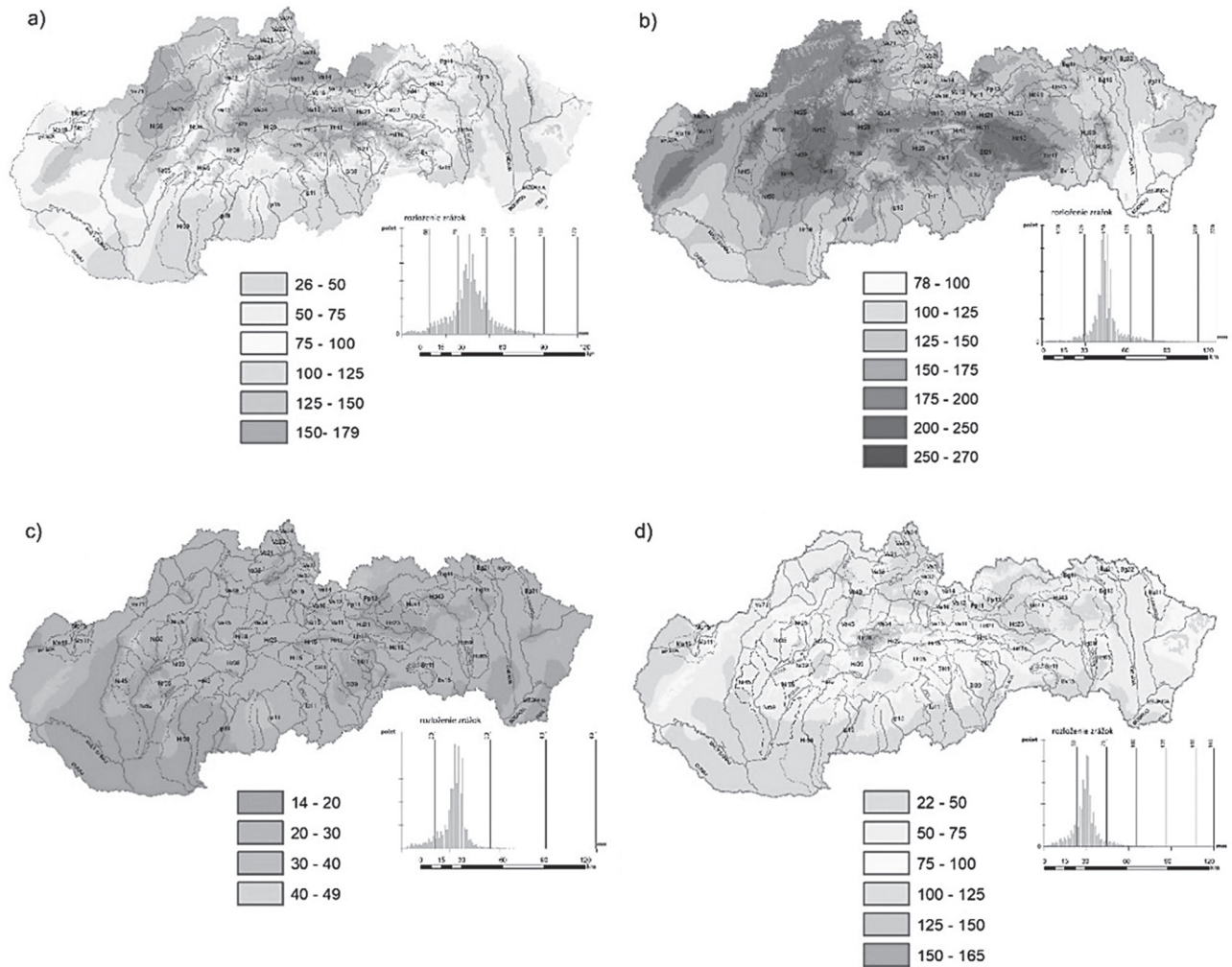
Trochu iná bola situácia na konci 4. kvartálu 2020, v mesiaci december. Na niektorých stanicích boli dosiahnuté SPA (Obr. 7), ale simulácie ani predpovede nenaznačovali výskyt povodní. V rámci hodnotenia modelov sa riešilo, čo mohlo spôsobiť takéto predpovede. Porovnávali sa merané a predpovedané teploty vzduchu (ktoré boli v dobrej zhode a boli väčšinou kladné), zásoby snehu a topenie snehu v hydrologických modeloch a predpovedané, merané a radarové úhrny zrážok. Z uvedeného vyplynulo, že radarové zrážky boli v tomto období vo viacerých povodiach podhodnotené. Na viacerých povodiach takéto podhodnotenie zodpovedalo 30–50 % meraných zrážok (Obr. 8 vpravo). Predpovedané zrážky boli tiež na viacerých povodiach podhodnotené, preto ani simulácie, ani predpovede nenaznačovali výskyt povodní.

Nadhodnotené a podhodnotené predpovede zrážok z meteorologického modelu Aladin

Niekedy sa stáva, že nadhodnotené predpovedané zrážky z modelu Aladin lepšia podhodnotené simulácie hydrologického modelu (Obr. 9). Pre užívateľov hydrologických predpovedí je samozrejme dôležitý výsledný produkt, publikovaná hydrologická predpoveď. Avšak cieľom odboru hydrologických predpovedí je takéto situácie identifikovať a eliminovať.

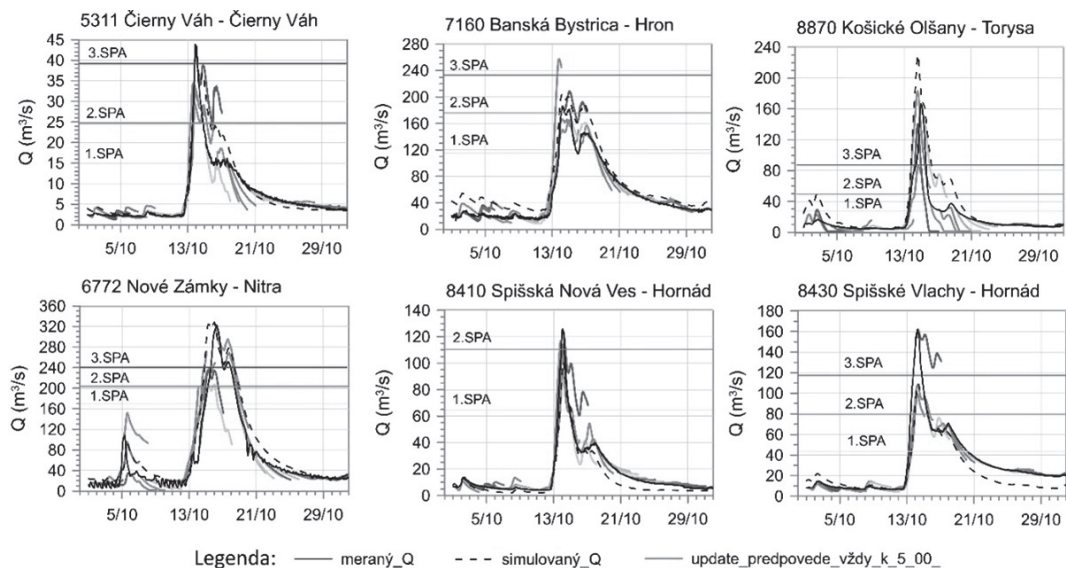
Letné búrkové obdobie je veľkou výzvou pre meteorologické a aj hydrologické predpovede. V letnom období júl až august 2020 boli v povodí hornej Tople, Toryse, Hnilci a na Poprade zaznamenané výrazné podhodnotenia predpovedaných úhrnov zrážok z modelu Aladin oproti reálne spadnutým v rozsahu 30–70 % meraných úhrnov zrážok (Obr. 10, povodie Torysy po VS Košické Olšany). Na iných povodiach boli naopak zaznamenané nadhodnotenia zrážok, niekde až dvojnásobné (Obr. 10, povodie Teplice po VS Sobotište). Takéto veľké odchýlky medzi predpovedanými a meranými úhrnmi zrážok nie sú počas letných búrok výnimočné. Búrky sa vyznačujú prevažne vysokými úhrnmi zrážok, ktoré spadnú za krátky čas na pomerne malom území. Úhrny zrážok môžu byť v priestore veľmi odlišné často aj vo veľmi malej vzdialenosti. Preto predpoveď ich presnej lokalizácie a času výskytu je náročnou úlohou a stále veľkou výzvou.

Obrázok 5. Mesačné klimatické úhrny zrážok (mm) v mesiacoch september až december 2020 (v poradí a) až d)).
 Figure 5. Monthly climatic precipitation totals (mm) for September to December 2020 (in order (a) to (d)).



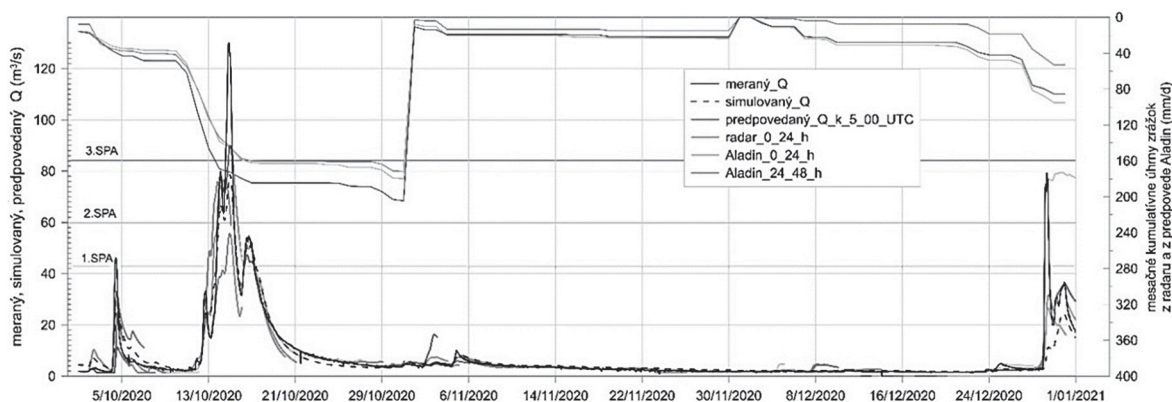
Obrázok 6. Ukážka niekoľkých predpovedných profilov s meranými, simulovanými a predpovedanými prietokmi v októbri 2020. V obrázku sú vyznačené aj stupne povodňovej aktivity (SPA).

Figure 6. Example of several forecast gauging stations with measured, simulated and forecasted discharges during the flood event in October 2020. The flood alert levels (SPA) are also indicated in the figure.



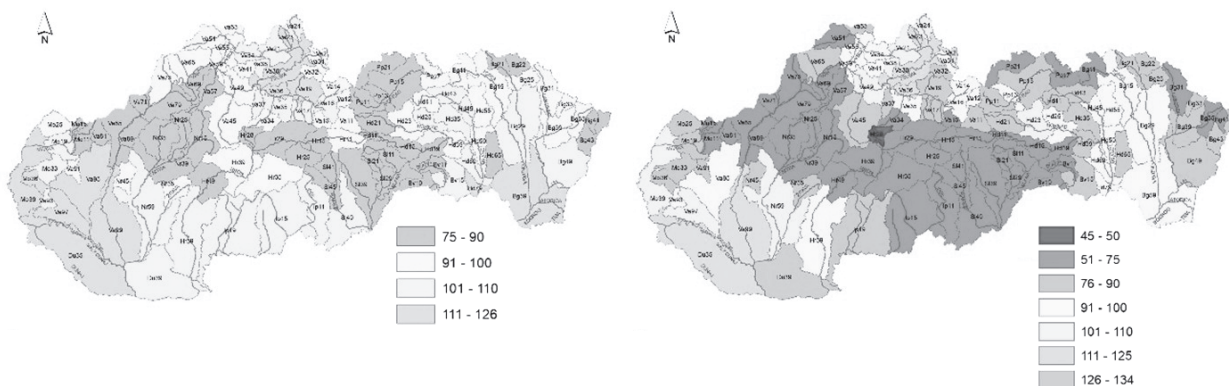
Obrázok 7. Merané, simulované a predpovedané prietoky a mesačné kumulované úhrny zrážok z radaru a z predpovede Aladin na dnes (0–24 h) a na zajtra (24–48 h) pre stanicu Chalmová - Nitra (VS 6570) pre obdobie 1. 10. – 31. 12. 2020. V obrázku sú vyznačené aj stupne povodňovej aktivity (SPA).

Figure 7. Measured, simulated and forecasted discharges and monthly cumulative precipitation totals from radar and Aladin forecasts for today (0–24 h) and tomorrow (24–48 h) for the station Chalmová - Nitra river for the period 1.10. – 31. 12. 2020. The flood alert levels (SPA) are also indicated in the figure.



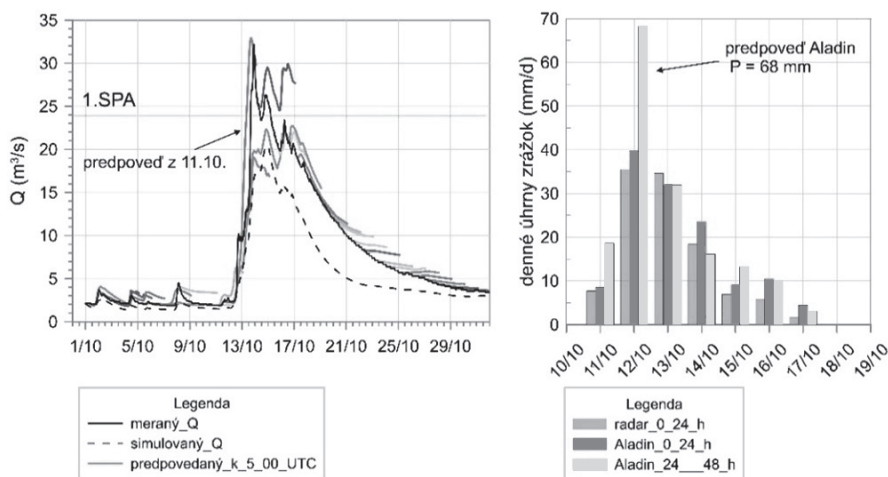
Obrázok 8. Podielové mapy (v %) priemerných mesačných úhrnov zrážok na povodie vypočítaných z radarových odhadov a z klimatických máp, vľavo október 2020, vpravo december 2020.

Figure 8. Proportion maps (%) of average monthly precipitation per catchment calculated from radar estimates and climate maps, on the left October 2020, on the right December 2020.



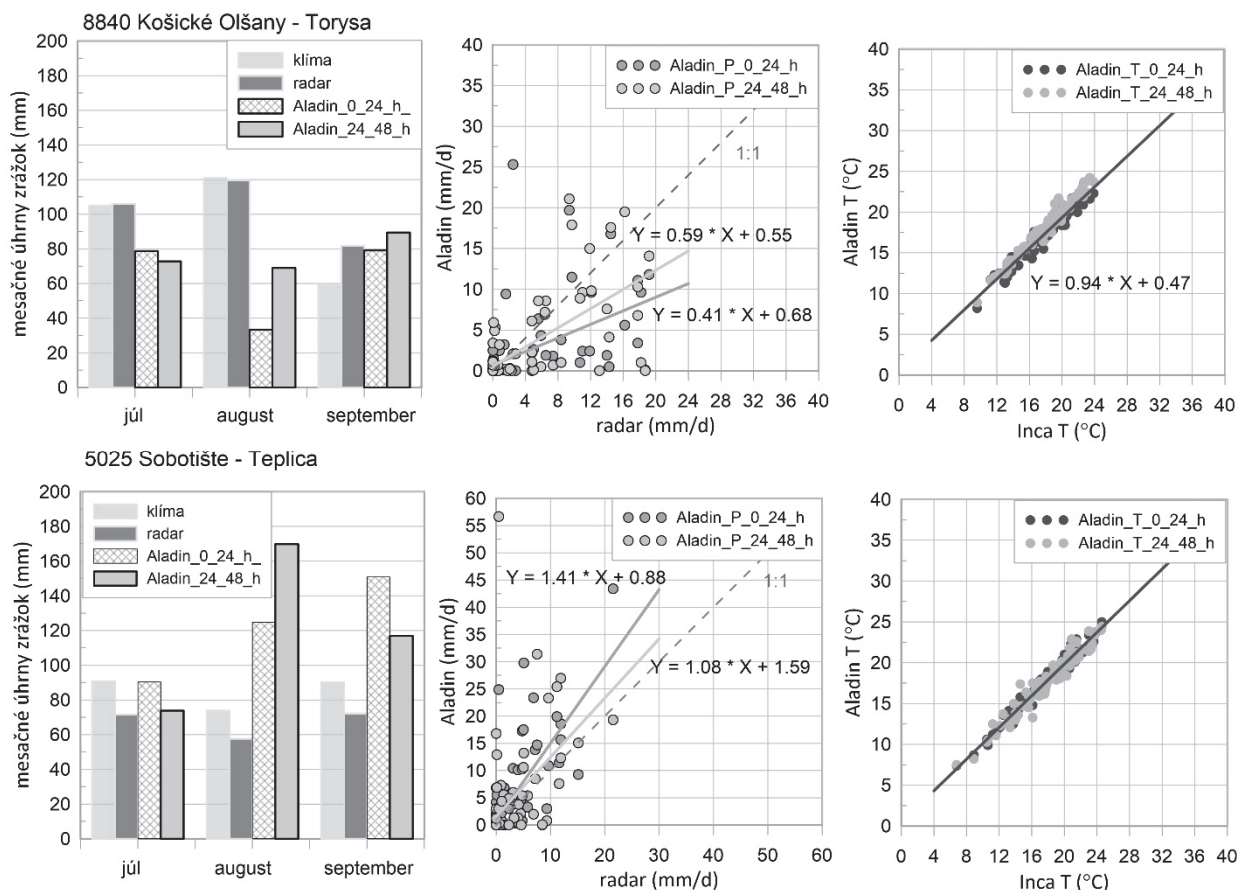
Obrázok 9. Merané, simulované a predpovedané prietoky pre VS 7045 Hronec - Čierny Hron (vľavo), denné úhrny radarových a predpovedaných zrážok z modelu Aladin na dnes (0–24 h) a na zajtra (24–48 h) v mesiaci október 2020 pre povodie Čierneho Hrona po Hronec.

Figure 9. Measured, simulated and forecasted discharges for the station Hronec - river Čierny Hron (on the left), daily radar and predicted precipitation totals from the Aladin model for today (0–24 h) and tomorrow (24–48 h) in the month of October 2020 for the basin of Čierny Hron up to the station Hronec.



Obrázok 10. Mesačné úhrny zrážok (obr. vľavo), denné úhrny zrážok z radaru v porovnaní s predpovedanými zrážkami z modelu Aladin na 1. deň (0–24 h) a Aladin na 2. deň (24–48 h) (obr. v strede), aktuálne priemerné denné teploty vzduchu z produktu Inca v porovnaní s predpovedanými teplotami z modelu Aladin (obr. vpravo) vyhodnotené pre dve povodia v období 1. 7. – 30. 09. 2020.

Figure 10. Monthly precipitation totals (Fig. on the left), daily precipitation totals from radar compared to forecasted precipitation from the Aladin model for day 1 (0–24 h) and Aladin for day 2 (24–48 h) (Fig. in the center), actual mean daily air temperatures from the Inca product compared to forecasted temperatures from the Aladin model (Fig. on the right) evaluated for the two watersheds of Torysa and Teplica rivers for the period from the 1st of July to the 30rd of September 2020.



ZÁVERY

Tvorba kvalitných hydrologických predpovedí má neoceniteľný význam pre skoré vydávanie hydrologických výstrah na povodňové situácie, ktoré sú spojené najmä s trvalými zrážkami alebo topiacim sa snehom. Základom sú spoľahlivé meteorologické a hydrologické vstupy, či už merané alebo predpovedané, ako aj robustný a flexibilný, dobre nakalibrovaný hydrologický model.

Vo fyzicko-geografických podmienkach Slovenska platí, že väčšina predpovedných profilov uzatvára povodia, ktoré ležia v pramenných oblastiach riek. To znamená, že pri zachovaní doby predstihu vydávanej predpovede (48 hodín) väčšina objemu odtoku pochádza zo zrážok, ktoré sa ešte reálne nevyskytli a sú obsiahnuté v meteorologickej predpovedi zrážok. To je dôvod, prečo sa kvantitatívna predpoveď zrážok považuje u odbornej verejnosti za najväčší zdroj neistôt pri tvorbe hydrologických predpovedí. To má aj praktické dôsledky pre protipovodňovú ochranu miest a obcí. Napríklad v prípade Banskej Bystrice extrémne povodňové vlny postupujúce po toku z Horehronia ne-

poskytujú dostatok času na realizáciu protipovodňových opatrení (osádzanie mobilných stĺpikov a hradenia). Prevádzkovateľ stavby bude musieť reagovať nielen na základe aktuálnej hydrometeorologickej situácie, ale najmä na základe jej predpovede. Meteorologické predpovede atmosférických zrážok a teploty vzduchu a ich transformácia na predpokladaný odtok pomocou hydrologického modelu predlži čas potrebný na realizáciu protipovodňových opatrení. Inými slovami, v procese rozhodovania bude veľký dôraz kladený na kvalitu meteorologickej a hydrologickej predpovede s dobou predstihu dlhšou, ako je postupová doba povodňovej vlny.

Na Odbore Hydrologické predpovede a výstrahy SHMÚ sa hodnotia hydrologické predpovede pre 53 vodomerých profilov 4-krát za rok a jedno komplexné hodnotenie sa realizuje pre hodnotené vodomeré profily raz za rok. Cieľom je kvantifikovať jednotlivé zdroje neistoty, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou hydrologických predpovedí. Z hodnotení potom vyplývajú pre každú hodnotenú stanicu (povodie) odporúčania, ako napr. potreba recalibrácie hydrologického modelu ako celku, prípadne iba pre

špecifické situácie (napr. obdobie vysokých / nízkych prietokov, zimné obdobie s topením snehu a pod.). Dôležitým prínosom je spätná väzba zasielaná kolegom na Odbore dištančných meraní, ktorí sú zodpovední za merané údaje o zrážkach z radarov vstupujúcich do hydrologických modelov. Prínosom by mohlo byť aj využitie výsledkov zasielaných ako spätná väzba pre ďalší rozvoj modelov predpovede počasia pre náš región, napr. pre model ALADIN, na ktorého vývoji sa priamo podieľajú aj niektorí kolegovia z SHMÚ.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0340. Autori ďakujú celému kolektívu na Odbore Hydrologické predpovede a výstrahy v Bratislave a na Odboroch Hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy v Banskej Bystrici, Žiline a Košiciach, ktorí sa podieľajú na hodnotení hydrologických modelov.

LITERATÚRA

- Alfieri, L.–Pappenberger, F.–Wetterhall, F.–Haiden, T.–Richardson, D.–Salamon, P., 2014, *Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe*, *J. Hydrol.*, 517 913–922, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.035.
- Bergström, S., 1992, *The HBV model - its structure and applications*, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, SMHI Reports Hydrology, RH No. 4, Norrköping, 32 pp.
- Danáčová, M.–Földes, G.–Labat, M.M.–Kohnová, S.–Hlavčová, K., 2020, *Estimating the Effect of Deforestation on Runoff in Small Mountainous Basins in Slovakia*, *Water*, 12, 3113; doi:10.3390/w12113113.
- Hlavčová, K.–Kohnová, S.–Borga, M.–Horvát, O.–Šťastný, P.–Pekárová, P.–Majerčáková, O.–Danáčová, Z., 2016, *Post-event analysis and flash flood hydrology in Slovakia*, *J. Hydrol. Hydromech.*, 64(4), 304–315, doi: 10.1515/johh-2016-0041.
- Hrušková, K.–Kyselová, D.–Borsányi, P., 2019, *Scenáre možného vývoja odtoku v povodí horného Hrona po Banskú Bystricu*. In: *Manažment povodí a extrémne hydrologické javy 2019*, ZZVH, 8.-9.10.2019, Vyhne. ISBN 978-80-570-1236 [USB Flash Disk].
- Knoben, W.J.M.–Freer, J.–Woods, R.A., 2019, *Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4323–4331, doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019
- Krajčí, P.–Danko, M.–Hlavčo, J.–Kostka, Z.–Holko, L., 2016, *Experimental measurements for improved understanding and simulation of snowmelt events in the Western Tatra Mountains*, *J. Hydrol. Hydromech.*, 64(4), 316–328, doi: 10.1515/johh-2016-0038.
- Liu, Y.–Gupta, H.V., 2007, *Uncertainty in hydrologic modeling: toward an integrated data assimilation framework*, *Water Resour. Res.*, 43 (7), W07401, doi.org/10.1029/2006WR005756.
- Lopez, M.G.–Crochemore, L.–Pechlivanidis, I.G., 2021, *Benchmarking an operational hydrological model for providing seasonal forecasts in Sweden*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 1189–1209.
- Renard, B.–Kavetski, D.–Thyer, M.–Kuczera, G.–Franks, S., 2009, *Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors*, *Water Resour. Res.*, American Geophysical Union, 46, 78 p., doi.org/10.1029/2009WR008328.
- Sleziak, P.–Szolgay, J.–Hlavčová, K.–Duethmann, D.–Parajka, J.–Danko, M., 2018, *Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions*, *J. Hydrol. Hydromech.*, 66(4), 381–392, doi: 10.2478/johh-2018-0031.
- Széles, B.–Parajka, J.–Hogan, P.–Silasari, R.–Pavlin, L.–Strauss, P.–Blösch, G., 2021, *Stepwise prediction of runoff using proxy data in a small agricultural catchment*, *J. Hydrol. Hydromech.*, 69(1), 65–75, doi: 10.2478/johh-2020-0029.
- Unduche, F.–Tolossa, H.–Senbeta, D.–Zhu, E., 2018, *Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed*, *Hydrol. Sci. J.*, 63(8), 1133–1149, doi: 10.1080/02626667.2018.1474219.

Internetové zdroje

- Bulletin meteorológia a klimatológia Slovenská republika 2020, 26(10), Slovenský hydrometeorologický ústav, Odbor Klimatologická služba, ISSN 1338-7170, dostupné na: <https://www.shmu.sk/sk/?page=1613>.
- Povodňová situácia na tokoch v povodí Nitry a dolného Váhu v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické predpovede a výstrahy, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Povodne z trvalého dažďa v povodí Hrona, Iplľa, Slanej a Rimavy v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy Banská Bystrica, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Povodňová situácia na východnom Slovensku v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy Košice, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Povodňová situácia na tokoch v povodí horného a stredného Váhu v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy Žilina, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Správa o povodniach za rok 2020, SHMÚ, Centrum predpovedí a výstrah, Odbor Hydrologické predpovede a výstrahy, 129 p., dostupné na: [https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy#2021%20\(ro%C4%8Dn%C3%ADk%201\)](https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy#2021%20(ro%C4%8Dn%C3%ADk%201)).