

Tvorba map rizika sucha v lesních porostech na podkladě úpravy modelového výpočtu aktuální evapotranspirace

Development of maps of drought risk in forest stands based on the modification
of evapotranspiration calculation

Rostislav Fiala, Filip Chuchma

Český hydrometeorologický ústav, Brno, Česká Republika

Abstrakt

Od roku 2015 bylo území České republiky zasaženo několika intenzivními epizodami sucha, které měly v některých oblastech velmi negativní dopad na lesní porosty. Úkolem bylo ověřit možnosti úpravy modelování vláhových charakteristik indikujících výskyt sucha pro použití v lesních porostech. Jednalo se zejména o využití zpřesněných podkladů charakteristik měřených na několika lokalitách v lesních porostech a ověřit možnost plošného využití modelovaných výstupů. Byla provedena analýza modelových výstupů a dat z měření standardních meteorologických stanic a vlhkosti půdy v rámci lesních porostů. Hledány byly vztahy mezi měřením vlhkosti v lesních porostech a modelovými charakteristikami. Pro indikaci sucha byly zpracovány hodnoty aktuální vláhové bilance v teplém půlroce a také 3letý průměr poměru AET/PET v jarním období.

Klíčová slova: vlhkost půdy, agrometeorologický model, les, výpar, vláhová bilance

Abstract

Since 2015, the Czech Republic has been affected by several drought episodes, which in some areas have had a very negative impact on forest stands, which have been severely damaged. The task was to verify the possibilities of modifying the calculation of moisture characteristics indicating the occurrence of drought in forest stands. There were used more accurate characteristics measured at several localities in forest stands and the possibility of using modeled outputs was verified. The analysis of data from measurements of meteorological stations, several stations in forest stands, model outputs and soil moisture measurements in forest stands was analyzed and the links between the resulting model characteristics were investigated. The values of the water balance in the warm half-year and also the 3-year average ratio of the actual evapotranspiration to potential evapotranspiration were processed in the form of map outputs.

Key words: soil moisture, agrometeorological model, forest, evaporation, water balance

Úvod

S probíhajícími klimatickými změnami pozorujeme častější výskyt hydrometeorologických extrémů, mezi které patří mimo jiné ohrožení suchem. To bývá navíc umocněno vysokou mírou potřeby čerpání přírodních zdrojů. S ohledem na lokální podmínky a aktuální průběh počasí může mít sucho dopad na všechny složky krajiny a vlivem dynamiky počasí i dynamiky retence vody v půdním a horninovém prostředí mohou být suchem ohroženy jednotlivé složky krajiny v různém čase. Z tohoto pohledu jsou velmi specifickým prostředím právě lesní porosty. Rozvoj sucha a výskyt jeho projevů, včetně doprovodných, se v lesních oblastech může od ostatních, např. zemědělsky využívaných, výrazně lišit. Zejména proto je nutné tomu přizpůsobit i používané metody monitoringu tohoto jevu. Současný monitoring sucha ČHMÚ využívá jako jeden ze svých vstupů agroklimatické charakteristiky modelu AVISO, který je vyvinut pro obecné klimatologické hodnocení a dále pro výpočet vláhových charakteristik pro zemědělskou půdu – zejména standardní travní porost a několik typů hlavních zemědělských plodin.

Od roku 2015 bylo území České republiky zasaženo několika intenzivními epizodami sucha, které měly v některých oblastech kritický dopad na lesní porosty. V průběhu několika sezón vyústila kombinace nepříznivých klimatických podmínek a biogenních činitelů v plošné usychání zejména smrkových porostů, a to napříč celou republikou.

Zejména v návaznosti na vlivy stresu suchem na lesní porosty s kulminací ve velmi suchém roce 2015 vznikl výzkumný projekt zabývající se vyhodnocením interakce různých činitelů s vlivem na usychání lesních porostů s cílem vytvoření metod identifikace a kvantifikace míry ohrožení suchem v lesních porostech. Úkolem našeho týmu v rámci subdodávky bylo ověřit možnosti úpravy agrometeorologického modelu pro modelování vláhových charakteristik indikujících možný výskyt sucha pro využití v lesních porostech. Základem bylo vyladění modelové intenzity evapotranspirace porostu s průběhem počasí, na což navazovala verifikace intenzity modelového čerpání vody z půdního profilu měřením v lesních porostech.

Stanovení začátku a konce sucha je velmi obtížné a vyžaduje řadu proměnných. Efekty působení sucha mají kumulativní charakter, přičemž negativní dopady sucha se zvyšují s každým dalším dnem jeho trvání. Důsledky sucha mohou přetrvávat i několik let poté, co je opět dosaženo normálních srážkových poměrů. (Blinka, 2004)

Zejména proto není snadné nalézt jeden určitý parametr, který by byl vhodný k identifikaci předpokladu či výskytu sucha jelikož na stav, vývoj a odolnost lesních porostů vůči suchu má vliv více faktorů – klimatických i porostních. (Braun, Remund & Rihm, 2015)

Materiál a metody

Pro výpočet vláhových charakteristik porostu byl využit agrometeorologický model AVISO („Agrometeorologická výpočetní a informační soustava“), který vznikl přibližně před 25 lety na brněnské pobočce Českého hydrometeorologického ústavu (Kohut, 2007). Byl vyvinut dle anglického výpočetního modelu MORECS (“The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System“), verze I. a II. (Hough a kol., 1997; Hough a Jones, 1997). Algoritmus modelu AVISO vychází z metodiky Penman-Monteith (výpočet evapotranspirace). Jelikož je model používán pro standardní travní porost a vybrané polní kultury, bylo nutno do něj aplikovat algoritmy výpočtu evapotranspirace modifikované pro lesní porosty. Základním prvkem byly metody používané v modelu MORECS II. (Hough a kol., 1997; Hough a Jones, 1997), přičemž důraz byl kladen na porosty jehličnaté.

Vstupními daty do modelu jsou hodnoty teploty a vlhkosti vzduchu, průměrná rychlost větru, délka slunečního svitu a úhrn srážek měřené v denním kroku na meteorologických stanicích poblíž studovaných lesních porostů. V první fázi tedy proběhla příprava souboru dat měřených meteorologických dat, a to jak ze staniční sítě ČHMÚ, tak také ze 4 vybraných pokusných měřících ploch v rámci lesních porostů. Na datech z pokusných lokalit byla následně provedena kontrola kvality a statistické srovnání s hodnotami z nejbližších stanic měřící sítě ČHMÚ. Největší vzdálenost srovnávaných lokalit nepřesahuje 30 km u větru, teploty a vlhkosti. U srážek je to pak ještě méně, nejvzdálenější stanice je 17,2 km daleko od pokusné lokality. Důvodem pro provedení srovnání datových sad z pokusných lesních lokalit a stanic ČHMÚ byla potřeba ověření, zdali data z měření na pokusných lokalitách mohou vstupovat do modelu pro výpočet vlhkostních charakteristik, což je potřebné pro následné validace modelu po aplikování případných modifikací. Dále je srovnání s daty ze staniční sítě ČHMÚ žádoucí z důvodu, že data ze staniční sítě slouží jako primární vstup dat pro výpočty vlhkostních charakteristik potřebných pro monitoring sucha v rámci celého území ČR.

Modelování aktuální evapotranspirace a změn zásoby vody v půdě bylo provedeno pro tři lokality s jehličnatými porosty, přičemž měření půdní vlhkosti bylo prováděno na třech místech v každé lokalitě (porostu). Pro verifikaci modelu byl pro každou lokalitu vypočten průměr ze 3 měření. Půdní vlhkost v objemových procentech (měření v terénu) a relativní nasycení v procentech využitelné vodní kapacity (výstup modelu) byly mezi sebou převáděny pomocí hodnot laboratorně stanovených hydrolimitů půd jednotlivých lokalit.

Výpočet modelu AVISO byl pro všechny experimentální lokality proveden při nastavení porostu s co nejvíce odpovídajícími parametry (výška porostu, LAI, hloubka kořenů) a dále pro různé kombinace vzájemného nastavení hodnot koeficientů charakterizujících fyziologii

lesního porostu (základní stomatální odpor, hodnota vlhkosti půdy při poklesu intenzity evapotranspirace). Výsledná modelovaná vlhkost půdy byla porovnána s průměrnou měřenou.

Porovnání verzí modelu s měřením v lesích bylo provedeno zejména ve dvou aspektech:

1. intenzita čerpání vody z půdy - porovnání průběhu modelované a měřené vlhkosti půdy v poklesové křivce,
2. reakce modelu na atmosférické srážky - porovnání modelované a měřené vlhkosti v extrémních hodnotách - reakce modelu v přechodech mezi hodnotami sucha a provlhčení.

Modelový výpočet byl 1. dubna a 1. července kalibrován na měřenou vlhkost. Porovnání modelu a měření bylo prováděno s ohledem na tuto skutečnost.

Stres suchem, který se projevuje zvýšením stomatálního odporu rostliny a snížením intenzity výparu je v modelu řešen následovně (Thompson et al., 1981 – původní model MORECS 1).

V prvním kroku je stomatální odpor r_{sc} měněn vlivem průměrné denní teploty (T) takto:

$$\text{pro } -5 < T < 20 \text{ } ^\circ\text{C:} \quad r_{sc} = 25 * r_{sc(\text{min})} / (T + 5)$$

$$\text{pro } T > 20 \text{ } ^\circ\text{C:} \quad r_{sc} = r_{sc(\text{min})}$$

$$\text{pro } T < -5 \text{ } ^\circ\text{C:} \quad r_{sc} = 10\,000$$

kde $r_{sc(\text{min})}$ je základní (minimální) stomatální odpor při průměrné hodnotě $T=20 \text{ } ^\circ\text{C}$ a sytostním doplňku $\delta e=0$. V modelu MORECS je hodnota stomatálního odporu pro jehličnaté porosty $r_{sc(\text{min})} = 70 \text{ s.m}^{-1}$.

Další úprava r_{sc} je vlivem sytostního doplňku následujícím vztahem:

$$r_{sc} = r_{sc(\delta e=0)} / (1 - 0,05 * \delta e^{(1 - \delta e^2)^{0,0001333}})$$

kde $r_{sc(\delta e=0)}$ je výsledkem předchozí úpravy dle teploty.

Dalším krokem je výpočet aktuální evapotranspiraci progresivním snižováním potenciálních hodnot na nulovou tak jako klesá zásoba vody z jejího maxima k nule. Tím je řízen růst stomatálního odporu z potenciální hodnoty r_{scp} na aktuální r_{sca} pro rovnici aktuální evapotranspirace následovně:

$$r_{sca} = r_{scp} * (2,5 / (1 - \text{BOTSMD}/(1 - p)*\text{VVK}) - 1,5)$$

kde: r_{scp} je odpor plodiny bez vodního stresu,

VVK je využitelná vodní kapacita (maximální voda dostupná rostlinám),

BOTSMD je deficit půdní vláhy v zóně méně dostupné části VVK (pod bodem snížené dostupnosti daný vztahem $\text{BOTSMD} = (1-p)*\text{VVK}$

kde: p - poloha lentokapilárního bodu v procentech VVK (v modělu AVISO $p = 50$).

Po odladění parametrů modelu byl stanoven modelový standardní jehličnatý porost pro území ČR a byl proveden výpočet modelu pro celou staniční síť ČHMÚ. Výpočet byl pokusně proveden pro období let 2003 až 2018, jelikož v posledních letech je rok 2003 považován za suchý. Za účelem vytvoření mapových výstupů byly z modelových výsledků potenciální a aktuální evapotranspirace následně vypočteny další charakteristiky potenciálně použitelné pro odhad ohrožení lesních porostů suchem v rámci celého území ČR. Jednalo se zejména o poměr aktuální a potenciální evapotranspirace (AET/PET), vláhovou bilanci srážek a aktuální evapotranspirace (SRA-AET) a 3letý průměr poměru AET/PET za první 3 měsíce vegetační sezony - duben až červen (zjednodušení a modifikace metody dle Braun et al. (2015), kteří pro srovnání s mortalitou lesních porostů užívají 3letý průměr poměru AET/PET za prvních 80 dní na počátku veg. sezony). Některé charakteristiky byly v jednotlivých letech srovnány s průměrem za celé modelované období 2003–2018.

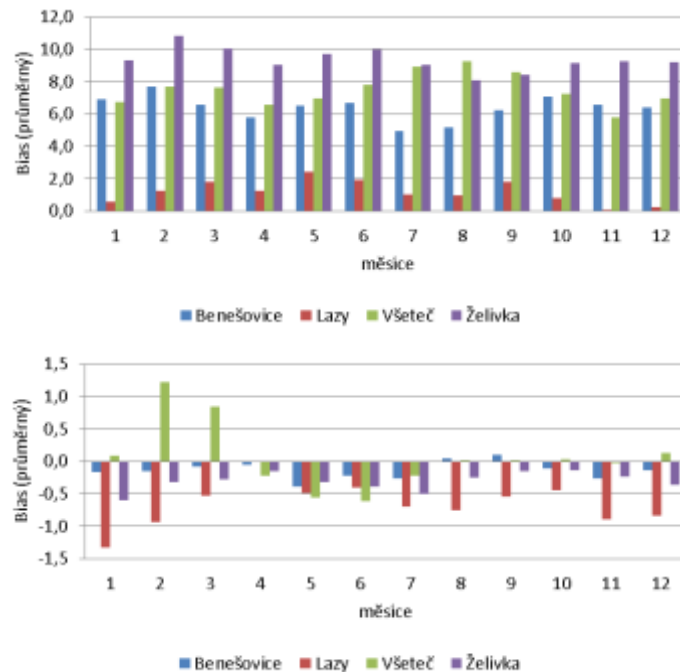
Výsledky a diskuze

Z okolních stanic ČHMÚ byla vypočítána pro každou pokusnou lokalitu řada tzv. očekávaných hodnot meteorologického prvku v denním kroku. Pro každý meteorologický prvek bylo provedeno srovnání řady měřených dat na pokusné lokalitě a řady očekávaných hodnot. Jako ukazatelé byly zpracovány korelační koeficient, průměrný bias a průměrná absolutní odchylka (MAE).

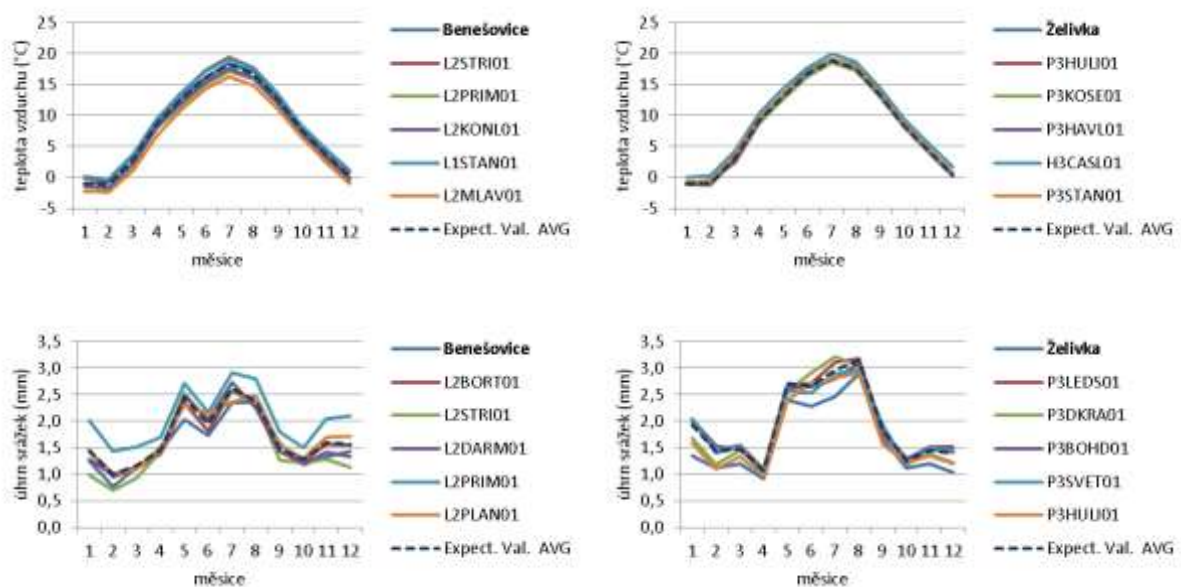
Hodnoty korelačního koeficientu mezi měřenými a vypočítanými očekávanými hodnotami rychlosti větru se u všech lokalit pohybují v podobných mezích a nejsou příliš vysoké. Pro vlhkost vzduchu na zkoumaných lokalitách naopak platí, že korelace jsou převážně vysoké. Jak je patrné z analýzy biasu (Obr. 1), 3 ze 4 pokusných lokalit vykazují v průměru vyšší denní hodnoty vlhkosti vzduchu než jejich okolí. Korelační koeficienty u teploty vzduchu jsou u všech lokalit velmi vysoké, což značí velmi těsný vztah mezi měřenými hodnotami teploty na pokusných lokalitách a sousedících stanicích. U úhrnů srážek lze vzhledem k prostorové i časové variabilitě srážek očekávat výraznou variabilitu v korelacích u řad naměřených dat a očekávaných hodnot. Nejvyšší hodnoty korelačního koeficientu jsou patrné u všech lokalit hlavně v teplém půlroce, v zimních měsících jsou naopak nižší.

Z analýzy ročních chodů průměrných denních hodnot meteorologických prvků (Obr. 2) je možné rozeznat rozdíly v průběhu roku mezi jednotlivými řadami meteorologických prvků na daných lokalitách a také je zde názorně vidět jak vypočtené očekávané hodnoty z okolí korespondují s měřenými daty jednotlivých prvků na pokusných lokalitách. Nejvíce problematický se jeví vítr, přesto na 3 pokusných lokalitách ze 4 očekávané hodnoty celkem

spolehlivě korespondují s měřenými hodnotami i přes rozdíly mezi jednotlivými stanicemi. U teploty a vlhkosti vzduchu je možné hovořit o velmi dobré shodě mezi měřenými a vypočítanými hodnotami. V ročních chodech průměrných denních úhrnů srážek je pak logicky patrná výraznější prostorová variabilita, nicméně i tato data jsou vzhledem k převažující shodě použitelná, případně je možné provést mírnou korekci hodnot.



Obr. 1 Vlhkost vzduchu a úhrn srážek - průměrný bias pro měsíce, srovnání měřených hodnot z pokusné lokality x očekávané hodnoty (výpočet z okolních stanic ČHMÚ)



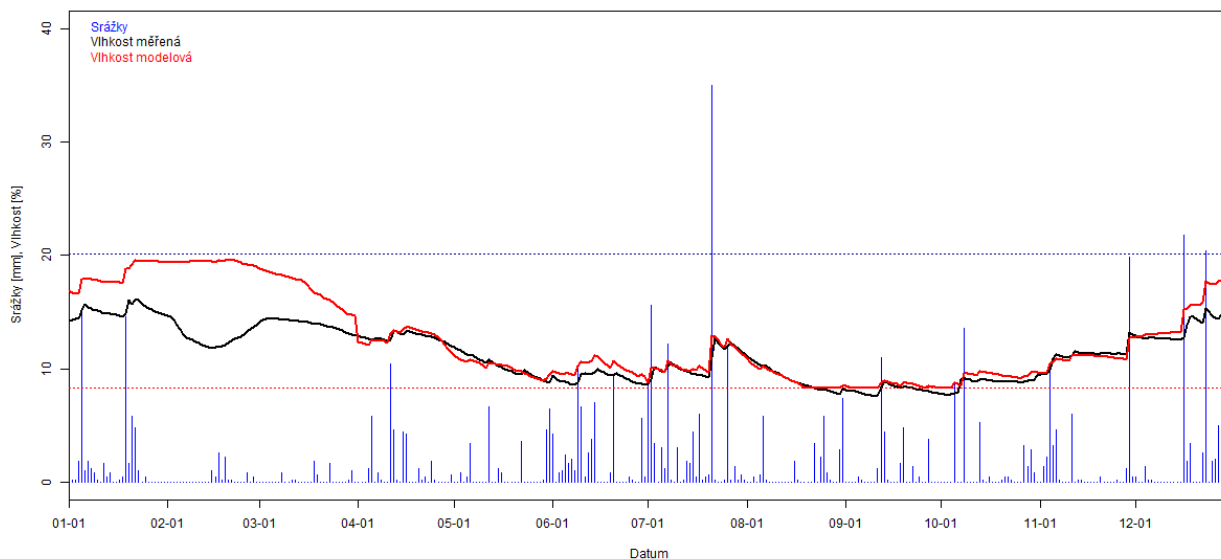
Obr. 2 Příklad srovnání průměrného ročního chodu teploty vzduchu a denních úhrnů srážek z 2 pokusných lokalit a odpovídajících referenčních stanic ČHMÚ (řada Expect. Val. AVG zobrazuje očekávanou hodnotu vypočtenou z okolních stanic), (zdroj měření v porostu: VÚLHM, QJ1630411)

Výsledky ukázaly na možnost vhodného využití staničních dat ČHMÚ jak pro doplnění chybějících dat tak i jako vstupu pro modelování vlhkostních charakteristik v lokalitách bez přímého měření, ale zároveň také odhalily některá úskalí s tím spojená.

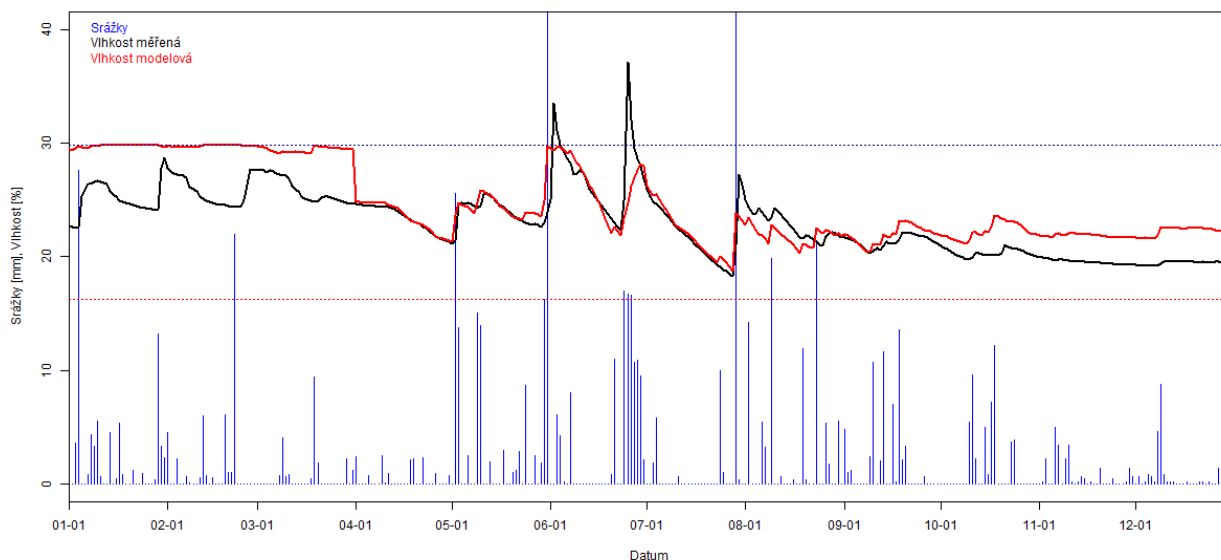
Na základě připravených vstupních dat proběhlo testování výpočtu modelu pro experimentální lokality. Cílem bylo otestovat parametry porostu tak, aby modelový výpočet evapotranspirace odpovídal reálnému. Hodnotícím kritériem bylo přiblížení modelované a měřené vlhkosti půdy v lesním porostu.

Ačkoli je velice důležité nastavení půdních vlastností, modifikace modelu pro využití v lesních porostech spočívá nejvíce v odladění hodnot výše popsaných vegetačních faktorů. Pro uvažované jehličnaté porosty dosahuje plocha listoví hodnot mezi cca 4 až 8 (zřídka 10) m^2/m^2 , přičemž s věkem a mírou opadu (defoliace) hodnota klesá (např.: Pokorný & Stojnič, 2012). Výška smrkových porostů se pohybuje v řádu desítek metrů, v hospodářských smrkových monokulturách dosahují stromy výšek kolem 30 m a kořeny smrkových porostů jsou rozprostřeny v horních vrstvách půdy. Odpor rostliny je závislý na fyziologických vlastnostech rostliny a charakteru okolního prostředí (teplotě a vlhkosti - vzduchu i porostu, oslunění listů a dostupnosti vláhy, atd.). Při výpočtu potenciální evapotranspirace travního i lesního porostu se v modelu AVISO (MORECS) uvažuje hodnota rezistence 70 s.m^{-1} . Na základě parametrů porostu, kterými jsou hlavně efektivní výška porostu, index plochy listoví, hloubka kořenů a základní stomatální odpor se provádí výpočet potenciální evapotranspirace. Změna intenzity evapotranspirace z potenciálních hodnot na aktuální je v modelu realizována pomocí všech proměnných, nejvíce však změnou stomatálního odporu, který se z nastavené základní (potenciální) hodnoty pro každý typ porostu mění v závislosti na okolním prostředí a dostupné. Zde hraje u porostu významnou roli stres suchem. V modelu se tak základní tabulková hodnota odporu přepočte v několika krocích na hodnotu upravující intenzitu transpirace porostu podle aktuálních podmínek vláze dle metody popsané výše.

Z testovaných variant nastavení modelu nejvíce s měřením korespondovalo nastavení parametrů snížení intenzity evapotranspirace při 40 % VVK, intercepce porostu = $0,3 \text{ mm} \cdot \text{LAI}$, základní stomatální odpor = 70 s.m^{-1} (tento parametr shodně s původním modelem MORECS).



Obr. 3 Příklad srovnání modelu a porostu v roce 2012 v lokalitě Benešov s kalibrací 1.4. a 1.7. (zdroj měření: VÚLHM, QJ1630411)



Obr. 4 Příklad srovnání modelu a porostu v roce 2013 v lokalitě Želiv s kalibrací 1.4. a 1.7. (zdroj měření: VÚLHM, QJ1630411)

Z testovacích grafů (vzorek uveden výše Obr. 3 a Obr. 4) je patrné, že model relativně dobře simuluje intenzitu čerpání vody z půdního profilu, je potřeba ovšem zmínit, že ve výsledcích se objevovaly i výrazné rozdíly, které mohou být způsobeny několika vlivy:

1. Měřením vstupních parametrů – problémy dány rozdíly v měření srážek v lesním porostu a na blízké stanici, případně doplněním chybějících měření z řad ČHMÚ z nejbližších stanic.

2. Intercepce / propad srážek lesním porostem a podrostem, infiltrace svrchní humusovou vrstvou. Na některé srážky reaguje pouze model a měření v porostu nikoli nebo naopak
3. Model nereaguje tak pružně na doplňování půdního profilu vodou ze srážek, což i při několika pokusech s nastavením intercepce nebylo vyladěno. Vstupuje zde tedy další faktor, jako jsou preferenční cesty a infiltrace, stok po kmenech, možná intercepce bylinným porostem, která však není na všech lokalitách konstantní a je tak velmi obtížné tyto podmínky věrně namodelovat.

Modelový lesní porost je vhodné pro účely budoucí tvorby plošných homogenních podkladů v rámci ČR standardizovat, obdobně jako je tomu u modelování pro standardní travní porost.

Jako porostní parametry byly finálně zvoleny unifikované parametry dospělého smrkového porostu takto: index plochy listoví = 8, efektivní výška porostu = 20 m, hloubka kořenové zóny = 0,4 m.

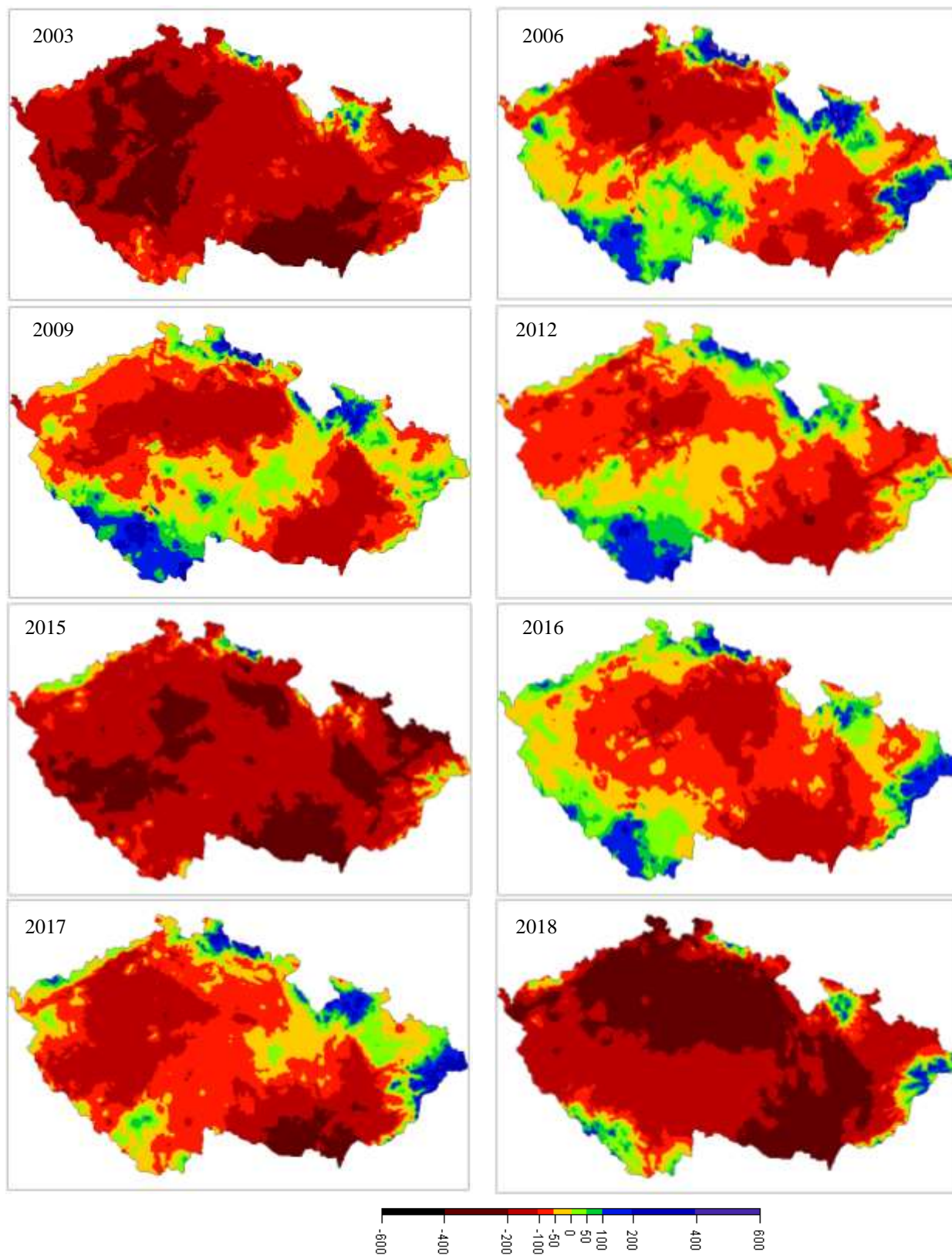
Pro zobecněný monitoring sucha v lesních porostech bylo rozhodnuto používat unifikované parametry z následujících důvodů:

- index plochy listoví (LAI) ovlivňující intercepci a výpar je u jehličnatých porostů v celém roce více méně konstantní,
- hloubka prokořenění ovlivňující čerpání vody z půdy je uvažována mělká nezávisle na lokalitě (geologickém podloží),
- jehličnaté porosty jsou nejrozšířenějším hospodářským typem,
- jehličnaté porosty jsou v poslední době poškozovány suchem a navazujícími disturbancemi.

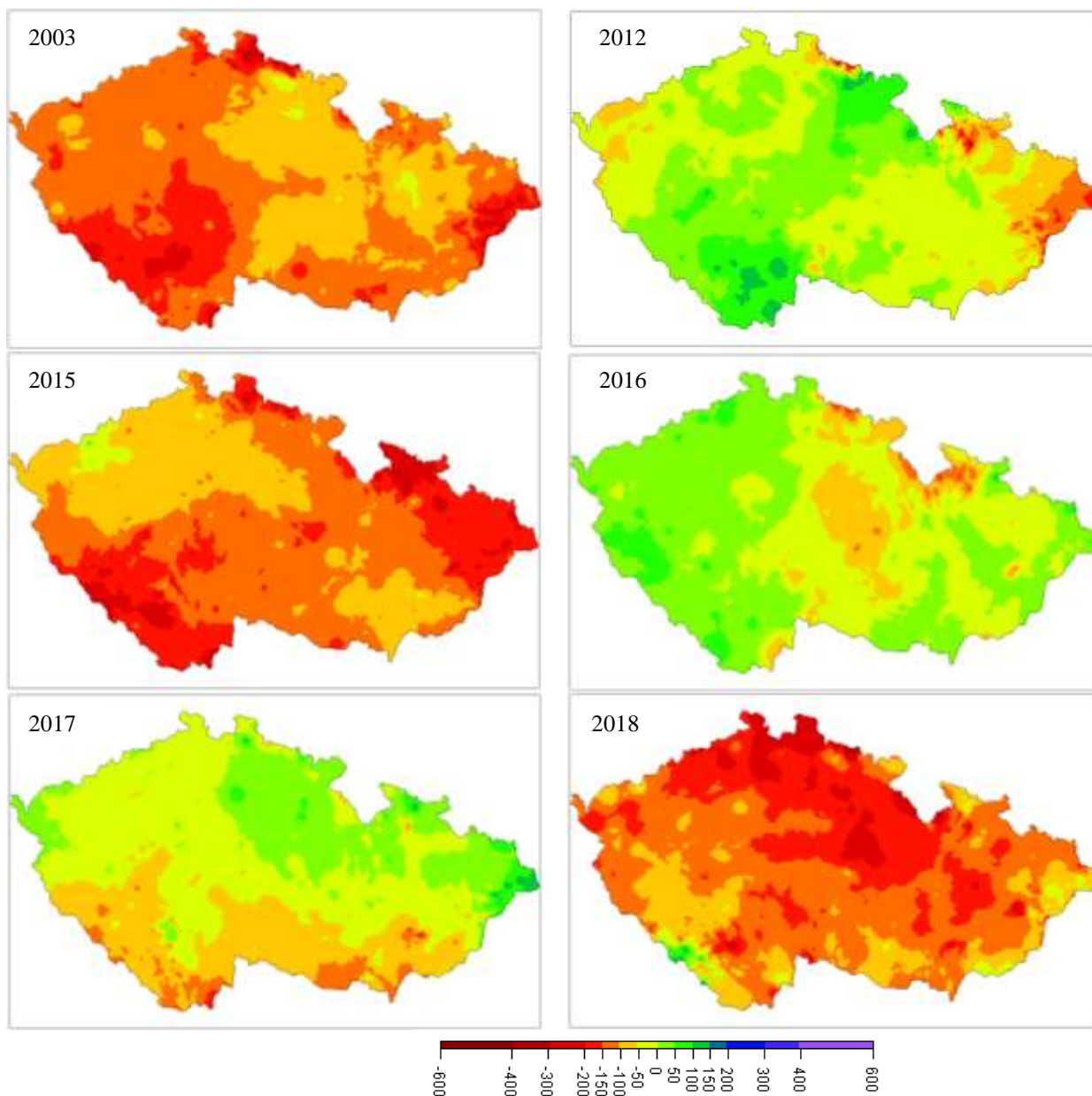
S použitím popsaných parametrů byly pro období 2003–2018 spočítány modelové hodnoty evapotranspirace a zpracovány výsledné mapové analýzy, a to pro období roku, vegetační sezony (duben až září) a u některých také za období duben – červen, vč. průměrných hodnot za vypočtené období 2003–2018 a odchylek jednotlivých let od tohoto průměru.

Na mapách níže (Obr. 5) je vyobrazena bilance srážek a aktuální evapotranspirace v sumě za vegetační období. Na jednotlivých letech je vidět výrazně záporná bilance v tradičních „suchých“ oblastech – jižní Morava, Haná, Polabí a Žatecko. V extrémně suchých letech 2003, 2015 a 2018 se v záporných barvách vyskytují též naše horské polohy, ve kterých to není obvyklé. Vzhledem k možnostem jisté adaptace porostů na lokální podmínky se právě v obvykle vlhčích lokalitách mohou následky suchých period projevit výrazněji nežli v oblastech sušších. Proto se jeví jako vhodné zobrazit též odchylky indexů od dlouhodobého průměru, jako negativní odchylku od dlouhodobých podmínek v dané lokalitě. Jelikož nejsou

zatím zpracovány data z let 1961–2002, byl jako dlouhodobý průměr použit průměr pouze z let 2003–2018. Vykreslení odchylky aktuální vláhové bilance za vegetační sezonu vybraných let od průměru z let 2003–2018 následuje na Obr. 6.



Obr. 5 Aktuální vláhová bilance modelového jehličnatého porostu za veg. období (duben–říjen) [mm]



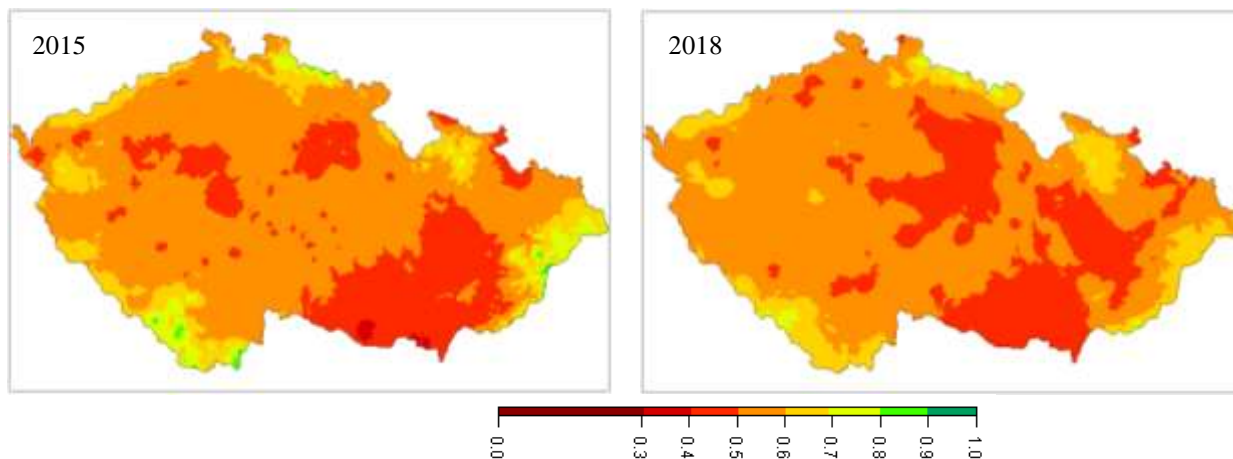
Obr. 6 Odchylka aktuální vláhové bilance modelového jehličnatého porostu za veg. období (duben–říjen) od průměru 2003–2018 [mm]

Ačkoli sumy vláhové bilance za vegetační období působí v horských oblastech převážně kladně, ve srovnání jednotlivých let s uvažovaným průměrem se některé roky projeví velmi negativně. Z pohledu horských oblastí byly výrazné deficity v oblastech a letech:

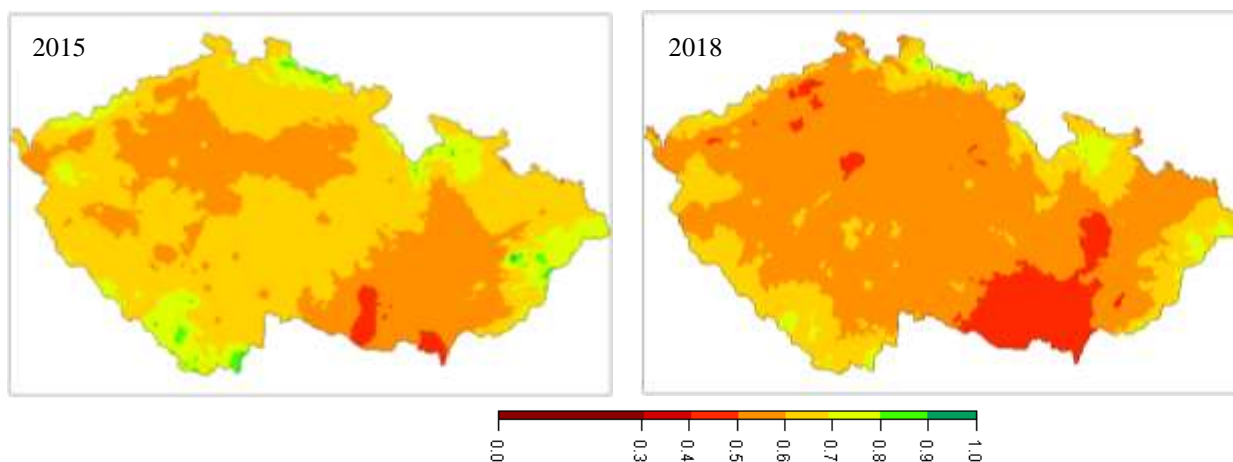
- Šumava - 2003, 2015 a 2017,
- Krušné hory - 2006, 2008 a 2018,
- Krkonoše - 2003, 2008, 2012, 2015, 2016, 2018,
- Jeseníky - 2003, 2004, 2012, 2015, 2016, 2018,
- Beskydy - 2003, 2004, 2007, 2009, 2012, 2013, 2015 a 2018,
- Vysočina - 2003, 2015, 2016 a 2018.

Braun a kol (2015) zjistili souvislost mortality smrkových porostů ve Švýcarsku s hodnotou poměru aktuální a potenciální evapotranspirace za prvních 80 dnů vegetační sezony až pro tři roky před zkoumaným rokem. Hodnotí daný index jednak v časovém horizontu 1 až 3 roky před uvažovaným rokem, jednak jako 3letý průměr. Pro jednoduchost jsme vyzkoušeli výpočet poměru pro první 3 jarní měsíce (duben-červen) vegetačního období. V obrázcích níže jsou uvedené 1leté hodnoty pro dané roky (Obr. 7) a 3leté průměry (Obr. 8).

Nejnižší hodnoty tohoto poměru pro 1 rok zobrazují tradiční suché oblasti, tedy výrazná podobnost s kalamitními lesními oblastmi posledních let je zřetelná více méně pouze na Vysočině, 3letý průměr je při stejné zvoleném rozsahu barev k vymezení oblastí ohrožení suchem (hodnoty $< 0,8$) výrazně „tolerantnější“.



Obr. 7 Podíl aktuální a potenciální evapotranspirace pro modelový jehličnatý porost za duben-červen [-]



Obr. 8 Tříletý průměr podílu aktuální a potenciální evapotranspirace pro modelový jehličnatý porost za duben-červen [-]

Závěr

V posledních letech bylo velké území hospodářských lesů oslabeno suchem s následnou disturbancí biotickými činiteli. To má katastrofální dopad na lesní hospodářství, a to z pohledu ekonomických ztrát i z hlediska urgentní potřeby změny v systému hospodaření. V případě opatření, které nelze zavést plošně s okamžitou platností je potřeba stanovit priority pro určité oblasti, které je nutno předem identifikovat, lokalizovat. Ačkoli lze některá zasažená či stresovaná místa odhalit zpracováním dat z dálkového průzkumu Země, matematické modely, které pracují na základě analogií a vstupů, jež je možno do jisté míry predikovat, mohou poskytnout potřebnou informaci o možném poškození porostů dříve, nežli se v daných lokalitách viditelně projeví. K tomuto účelu směřují právě metody popsané v tomto článku, jejichž smyslem je využít modelování vláhových charakteristik lesních porostů k identifikaci lokalit ohrožených výskytem sucha v aktuálním období či odhadnout možný vývoj v budoucích letech.

S ohledem na dynamiku změn v půdním prostředí i schopnost lesních ekosystémů do jisté míry odolávat stresovým faktorům, je vhodné, například pro analýzu možného dalšího vývoje ohrožení suchem, kombinovat více přístupů a indexů či metod.

Literatura

- BLINKA, P. (2004): Klimatologické hodnocení sucha a suchých období na území ČR v letech 1876–2003. In *Extrémy počasí a podnebí*, 11. března 2004, ČHMÚ Brno, 1–32.
- BRAUN, S., REMUND, J., RIHM, B. (2015): Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*. 166. 361-371. 10.3188/szf.2015.0361.
- HOUGH, M., JONES, R. J. (1997): The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS version 2.0 - an overview. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1997, 1(2), 227-239 p.
- HOUGH, M. a kol. (1997): *The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS version 2.0*. Meteorological Office Bracknell, Meteorological Office Wolverhampton, Bracknell 1997, 82 p.
- KOHUT, M. (2007): *Vláhová bilance zemědělské krajiny*. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Brno. 122 s.
- POKORNÝ, R., STOJNIC, S. (2012): Leaf area index of Norway spruce stand in relation to its age and defoliation. *Beskydy*. 5 (2): 173–180

ŠTĚPÁNEK, P. (2007): ProClimDB – software for processing climatological datasets. CHMI, Regional office Brno [online]. Brno. [cit. 2009-01-23]. Dostupné z: <http://www.climahom.eu/ProcData.html>

Poděkování:

Príspevek vychází z výzkumných aktivit a dílčích výsledků v rámci zpracování subdodávky pro projekt NAZV registrační číslo QJ1630411 (řešitel VÚLHM) a z výzkumných a inovačních aktivit dílčí koncepce rozvoje výzkumné organizace ČHMÚ.

Kontakt:

Ing. Rostislav Fiala

Český hydrometeorologický ústav

Kroftova 43

616 67 Brno

tel: 541 421 027

e-mail: rostislav.fiala@chmi.cz

Summary

Climate change is closely related to the risk of water scarcity in the landscape and subsequently drought. The impact of drought on forest stands tends to be specific, and its development and occurrence in forest areas also differ from agricultural landscapes. Therefore, it is appropriate to adapt the methods of drought monitoring. Since 2015, the Czech Republic has been affected by several drought episodes, which in some areas have had a very negative impact on forest stands, which have been severely damaged. So the task was to verify the possibilities of modifying the calculation of moisture characteristics indicating the occurrence of drought in forest stands. There were used more accurate characteristics measured at several localities in forest stands and the possibility of using modeled outputs was verified.

In preparation of inputs of data the data series of expected values of the meteorological element were calculated for each experimental site from the neighboring CHMI stations in the daily step. For each meteorological element a comparison of a series of measured data at the experimental site in the forest stand and expected values calculated from stations was made. The correlation coefficient, mean bias and mean absolute deviation (MAE) were analyzed. The comparison results showed the possibility of suitable use of station data both for adding

of missing data from forest stands measurements as well as for input for modeling moisture characteristics at locations without direct measurement. But it also revealed some of the pitfalls associated with.

To determine the possible occurrence and severity of drought in forest stands, potential and actual evapotranspiration, potential and actual water balance and available water in soil were used. The agroclimatic model AVISO (CHMI) based on the MORECS model was used for calculation of the characteristics. The analysis of data from measurements of meteorological stations, several stations in forest stands, model outputs and soil moisture measurements in forest stands was analyzed and the links between the resulting model characteristics from localities with different types of vegetation were investigated. For this reason, a various combinations of the coefficients settings characterizing the forest stand such as leaf area index, stomatal resistance of plants, point of reduced availability or rate of decrease in evapotranspiration intensity associated with soil moisture change were used. Mainly the intensity of evapotranspiration and the models reaction to precipitation were observed. From the several variations of tested model settings the intensity of evapotranspiration reduction at 40 % AWC, stand interception is set at $0.3 \text{ mm} \cdot \text{LAI}$ and basic stomatal resistance is set at $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ (this parameter is set to match the original MORECS model). The results show that the intensity of water withdrawal from the soil profile can be relatively well simulated but replenishment of soil water during significant precipitation episodes has proven to be more problematic. The calibration of the model calculation with real soil moisture data at the beginning of the growing season was also suitable.

The analysis and definition of possible indicators of drought for forest stands and the subsequent creation of special maps were developed for the general type of forest stands. It is obvious that for very variable forest stands in the Czech Republic it is more appropriate to standardize individual forest stands in terms of spatial drought monitoring and drought mapping, similarly to the modeling for standard grassland. For generalized monitoring of drought in forest stands it was decided to use unified parameters of coniferous forest for these several reasons: LAI affecting interception and evaporation is more or less constant in throughout the whole year, the depth of root affecting the pumping of water from the soil is considered shallow regardless of location and coniferous stands are the most widespread economic type in the Czech Republic and have been severely damaged by drought and its related disturbances recently.

The values of the sum of actual water balance between precipitation and actual evapotranspiration in the vegetation period, annual deviations of evapotranspiration from

mean value for the period 2003 – 2018 and 3-year average ratio of the actual evapotranspiration to potential evapotranspiration were processed as the drought indices in the form of map outputs to spatially indicate areas with drought. The maps for the growing season show a significantly negative value of water balance in usually dry areas. In the extremely dry years of 2003, 2015 and 2018, however, there are also mountain locations with significantly negative water balance values, in which this state is not usual in terms of moisture conditions. Although the sums of the actual water balance during the growing season are mostly positive in mountain areas, some years have shown very negative conditions in comparison with the average years. For this reason, it also seems appropriate to display index deviations from the long-term average.