

Využití modelů Euro-CORDEX pro predikci sucha s ohledem na holomrazy a srážkový deficit v chladném období roku

Use of Euro-CORDEX Models for Drought Prediction with Respect to Black
Frosts and Rain Deficit during the Cold Season

*Vera Potopová¹, Petr Štěpánek^{2,3}, Pavel Zahradníček^{2,3}, Aleš Farda², Luboš Tůrkott¹, Dita
Hřmanová¹*

*¹Česká zemědělská univerzita v Praze, FAPPZ, KAB ²CzechGlobe – Ústav výzkumu globální
změny AV ČR, v.v.i., Bělidla 4a, Brno 603 00 ³Český hydrometeorologický ústav, pobočka
Brno, Kroftova 43, Brno 616 00*

Abstrakt

Příspěvek se zaměřuje na analýzu změny v rozložení četnosti, délky trvání a závažnosti sucha v různých časových měřítkách pro historické i budoucí běhy regionálních klimatických modelů v rámci aktivity Euro-CORDEX. Analýzy jsou založené na experimentech se scénáři vývoje skleníkových plynů RCP4.5 a RCP8.5 v budoucích obdobích 2041 - 2070 a 2071 - 2100 včetně porovnání s referenčním obdobím 1981 - 2010. Pro kvantifikaci sucha byl z řady různých charakteristik zvolen standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI) a standardizovaný srážkový index (SPI) v pěti časových intervalech – 1, 3, 6, 12 a 24 měsíců. Odhady budoucích projekcí sucha dle SPI, mají tendenci podceňovat rizika sucha, zatímco riziko závažnosti sucha dle SPEI se zvyšuje do konce tohoto století, i přes mírný nárůst srážek.

Klíčová slova: regionální klimatické modely, SPEI, SPI, RCP4.5, RCP8.5

Abstract

This paper focuses on the analysis of changes in the distribution of frequency, duration and magnitude of drought for various time scales for two future time periods, 2041 - 2070 and 2071 - 2100 and compared to the reference period 1981 - 2010 under the two Representative Concentration scenarios RCP4.5 and RCP8.5. Dry events are calculated and analysed according to the classification of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and the standardized precipitation index (SPI). Estimates of future drought projections based on the SPI tend to underestimate risk, while risk of the SPEI drought magnitude increases by the end of the century, even if precipitation increases moderately.

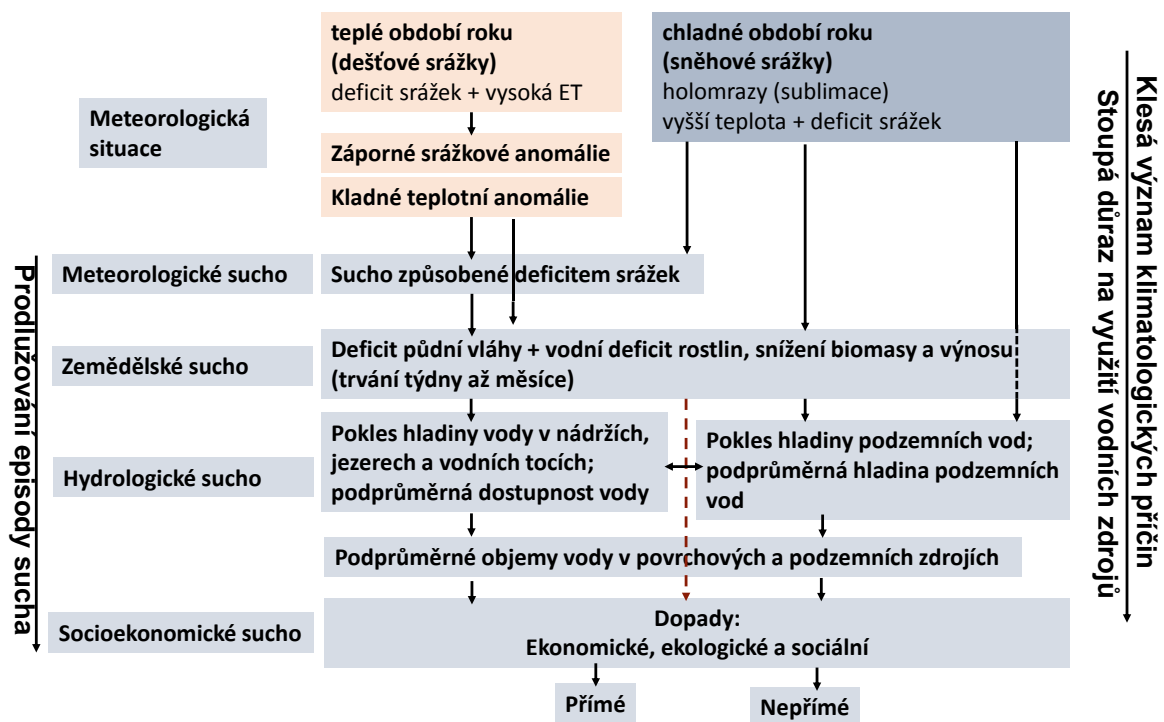
Keywords: Regional climate models, SPEI, SPI, RCP4.5, RCP8.5

Úvod

Zima bez sněhu, popř. s kratší dobou trvání nebo s menší výškou sněhové pokrývky (2006/2007, 2011/2012, 2013/2014 a 2014/2015) vytváří příznivé podmínky pro nástup jarního sucha (obr. 1a). V posledních deseti letech je viditelným důsledkem oteplení v zimním období pokles hodnot charakteristik sněhové pokrývky, zvláště ve středních a nižších polohách, což zásadně ovlivňuje především přezimování polních plodin, které jsou v případě výskytu holomrazů (tj. výskytu mrazů bez sněhové pokrývky) postiženy vymrzáním, neboť nejsou chráněny izolačními vlastnostmi sněhové pokrývky. Produktivita celé řady zemědělských plodin, výskyt chorob, škůdců a plevelů je částečně ovlivňována i charakterem, délkou trvání a vydatností sněhové pokrývky. Sněhová pokrývka je i důležitým zdrojem vláhy, která pomáhá rostlinám překonávat období sucha v pozdějších měsících vegetačního období. Tuto problematiku podrobně popisuje Potopová et al. (2016), kdy řeší vliv sněhové pokrývky na variabilitu vlhkosti půdy a vznik sucha během vegetačního období ve středních a nižších polohách území ČR. V rámci této studie bylo zjištěno, že negativní anomálie sněhových charakteristik mohou až o 45 % snížit množství vláhy v půdě především v květnu a červnu. Více než 52 % suchých vegetačních období následovalo po chladných obdobích s minimální vodní hodnotou sněhové pokrývky a 42 % z vlhkých vegetačních období následovalo po chladných obdobích s maximální vodní hodnotou sněhové pokrývky. Síla korelace mezi indexy sucha a anomáliemi půdní vlhkosti je pak vyšší v druhé části vegetačního období (červenec-srpen-září). Tento výsledek lze vysvětlit tím, že negativní anomálie sněhových charakteristik ve spojení se suchem, v zimě a na počátku vegetačního období, vedou k vyčerpání půdní vláhy, ke snížení evaporace resp. evapotranspirace a tím k omezení možnosti ochladit povrch půdy v pozdějších fázích vegetačního období.

Přezimování ozimých plodin je na výskytu a charakteristikách sněhové pokrývky výrazně závislé. Izolační vlastnosti sněhové pokrývky závisí především na výšce a kvalitě sněhu. Při teplotě vzduchu -20 °C může již 10 cm vrstva sněhu snížit působení mrazu v okolí rostlin na hodnotu -10 až -12 °C (Prášil a Prášilová, 2002). Mezi zimní stresové faktory patří mráz, sucho, zamokření, ledová vrstva, zaplavení aj. V případě holomrazů lze především u řepky ozimé pozorovat regionální postižení, kdy buď voda v rostlině zamrzne, zvětší svůj objem a roztrhá buněčná pletiva, nebo voda zamrzne v půdě, následně dojde k jejímu pohybu a poškození kořenového systému. Při častějším střídání vyšších a nižších teplot může dojít k vytahování rostlin. Mráz je tak u přezimující řepky dominujícím stresovým faktorem. Mrazuvzdornost rostlin řepky v průběhu vegetace a přezimování značně kolísá a to především v závislosti na předcházejícím průběhu počasí. Mezi hlavní meteorologické faktory

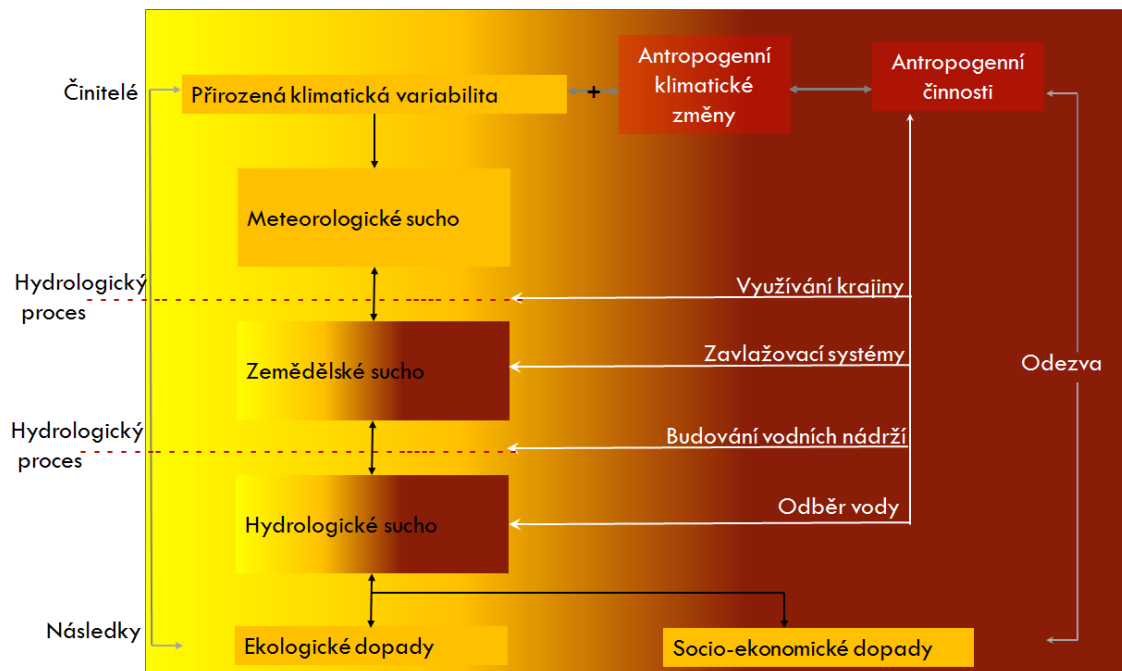
ovlivňující mrazuvzdornost řepky považuje Prášil a Prášilová (2002) intenzitu poklesu teploty vzduchu a půdy, vlhkost půdy, výšku a délku trvání sněhové pokrývky a sluneční svit. Klimatická změna přinášející časté kolísání a vyšší teploty v zimním období může negativně ovlivnit stabilitu mrazuvzdornosti řepky a tím ohrozit její přezimování. Dynamika mrazuvzdornosti řepky během zimy prochází třemi stádii. Prvním stadiem je otužování, kdy jsou hlavními meteorologickými faktory chlad a vlhkost půdy. Druhým stadiem je udržení odolnosti, které je závislé na mrznutí a tání a třetí stádium znamená ztrátu odolnosti způsobenou oteplením.



Obr. 1a Schématický vývoj typů sucha a jejich závislosti na meteorologických faktorech v chladném a teplém období roku.

Díky vyšším teplotám lze také očekávat více srážek v podobě deště, což způsobí nižší akumulaci vody ve sněhové pokrývce, popř. i její tání. Dojde ke snížení množství vody, které se z ní při tání může uvolnit na začátku vegetačního období (Brázdil et al. 2015). Sucho, které je statisticky vyhodnoceno jako výjimečné, má potenciál vytlačit ekosystém mimo hranice stanovené jeho přirozenou tolerancí k vodnímu stresu (Potopová et al. 2017). Extrémní sucha, v člověkem utvářeném prostředí, nelze považovat za zcela přírodní jev, ve skutečnosti lidská činnost aktivně ovlivňuje vznik, šíření a míru sucha. Loon et al. (2016) tvrdí, že pro úspěšný management sucha v antropocénu musí být do definice sucha plně integrován také lidský faktor. Pro shrnutí lze říci, že zemědělské a hydrologické sucho je důsledkem nízkých vstupů do hydrologického systému (např. nedostatek srážek, tání sněhu, zavlažování), vysokých

výstupů (např. vysoká evapotranspirace a lidská spotřeba vody) a omezeného ukládání vody (retenční schopnost krajiny, podzemních vod a nádrží) (obr. 1a). Z toho vyplývá, že lidská činnost ovlivňuje vstupní, výstupní a retenční parametry hospodaření s vodou a vede ke změnám šíření sucha. V případě absence přírodních regulačních mechanismů může být i samotnou příčinou vzniku sucha. Vzájemná provázanost těchto jevů je znázorněna na obr. 1b.



Obr. 1b Proces šíření sucha zahrnující přírodní a lidský faktor včetně zpětných vazeb v měnícím se klimatu (upraveno dle Loon et al. 2016).

Pro predikci sucha musíme pochopit, jak je deficit srážek transformován do zemědělského a hydrologického sucha, a následně jak lidská činnost pozitivně i negativně ovlivňuje tuto transformaci. Faktory spojené s vlivem lidské činnosti na klimatický systém zahrnují především emise skleníkových plynů a aerosolů, ale také změny ve využívání povrchu. Nejistotu v budoucím vývoji emisí skleníkových plynů a aerosolů lze hodnotit pomocí modelových simulací pro různé emisní scénáře (Holtanová a Kalvová, 2015). Jedná se o alternativní možnosti vývoje společnosti a předpokládaných emisí. V současné době se již využívají aktualizované tzv. Reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP), tj. série čtyř nových scénářů vývoje koncentrací skleníkových plynů. Pro analýzu budoucího vývoje sucha a dopadu globálního oteplování na meteorologické, zemědělské a hydrologické sucho na území ČR byly použity nejnovější výstupy z iniciativy Euro-CORDEX (www.euro-cordex.net). Příspěvek se zaměřuje na analýzu změny v rozložení četnosti, délky trvání a závažnosti sucha v různých časových měřítkách pro historické i budoucí běhy regionálních klimatických modelů z aktivity Euro-CORDEX. Analýzy jsou založeny na experimentech se

scénáři vývoje skleníkových plynů RCP4.5 a RCP8.5 v budoucích obdobích 2041 - 2070 a 2071 - 2100 včetně referenčního období 1981 - 2010.

Materiál a metody

Pro kvantifikaci sucha byl z řady různých charakteristik zvolen Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI, Vicente-Serrano et al. 2010) a Standardizovaný srážkový index (SPI, McKee et al. 1993) v pěti časových intervalech – 1, 3, 6, 12 a 24 měsíců, které byly vybrány s ohledem na identifikaci meteorologického, zemědělského a hydrologického sucha. Kvantifikace indexu SPI je založena jen na měsíčním úhrnu srážek a SPEI na základě difference mezi potenciální evapotranspirací a srážkami (P-PET) v jednoduché klimatické vodní bilanci. SPI je tedy založen pouze na srážkách a nebere v úvahu tendence změny teplot způsobující vysychání půdy. Proto nám SPI umožňuje oddělit vliv srážek na výskyt sucha, zatímco SPEI charakterizuje vliv evapotranspirace na sucho. V této práci byla PET vypočtena metodou Penman-Montheitha (PM, Allen et al. 1998), kdy je sucho hodnoceno měsíčně (leden-prosinec) a za celé vegetační období (duben – září) pro oblasti s nadmořskou výškou do 400 m (I - oblasti s intenzivní zemědělskou výrobou), 401 až 700 m (II - oblasti s méně intenzivní zemědělskou výrobou a menším zalesněním) a nad 700 m (III - oblasti s limitovanou zemědělskou výrobou a převládajícím zalesněním), a to na základě údajů 184 klimatických stanic v období 1961 - 2100. Vstupní data do modelu, u kterých byla provedena kontrola kvality dat, homogenizace a doplnění všech chybějících hodnot a úseků (Štěpánek et al. 2013), byla: maximální a minimální teplota vzduchu, rychlost větru, trvání slunečního svitu, poměrná vlhkost vzduchu a úhrn srážek. Nejprve bylo na jednotlivých klimatologických stanicích vymezeno období výskytu meteorologického sucha ($SPEI \leq -1$ a $SPI \leq -1$ za 1 měsíc), zemědělského sucha ($SPEI \leq -1$ a $SPI \leq -1$ za 3 a 6 měsíců) a hydrologického sucha ($SPEI \leq -1$ a $SPI \leq -1$ za 12 a 24 měsíců). Na základě měsíčních hodnot SPI a SPEI v rámci vegetačního období (duben-září) byla vypočtena četnost výskytu (poměr mezi počtem výskytů a celkovým počtem událostí, %), délka trvání (počet měsíců během vegetačního období) a závažnost sucha (suma těchto indexů v epizodě) pro dva scénáře koncentrací RCP4.5 (střední emise; $4,5 \text{ W.m}^{-2}$) a RCP8.5 (vysoké emise; $8,5 \text{ W.m}^{-2}$) a 8 regionálních klimatických modelů (RCM) řízených 5 globálními klimatickými modely (GCM) v časových horizontech 2041 - 2070 resp. 2071 - 2100 a v referenčním období 1981 - 2010. Nicméně, hodnocení projekce možného vývoje sucha v průběhu 21. století dle měsíčních hodnot SPI a SPEI bylo provedeno pro celé budoucí období do roku 2100 bez

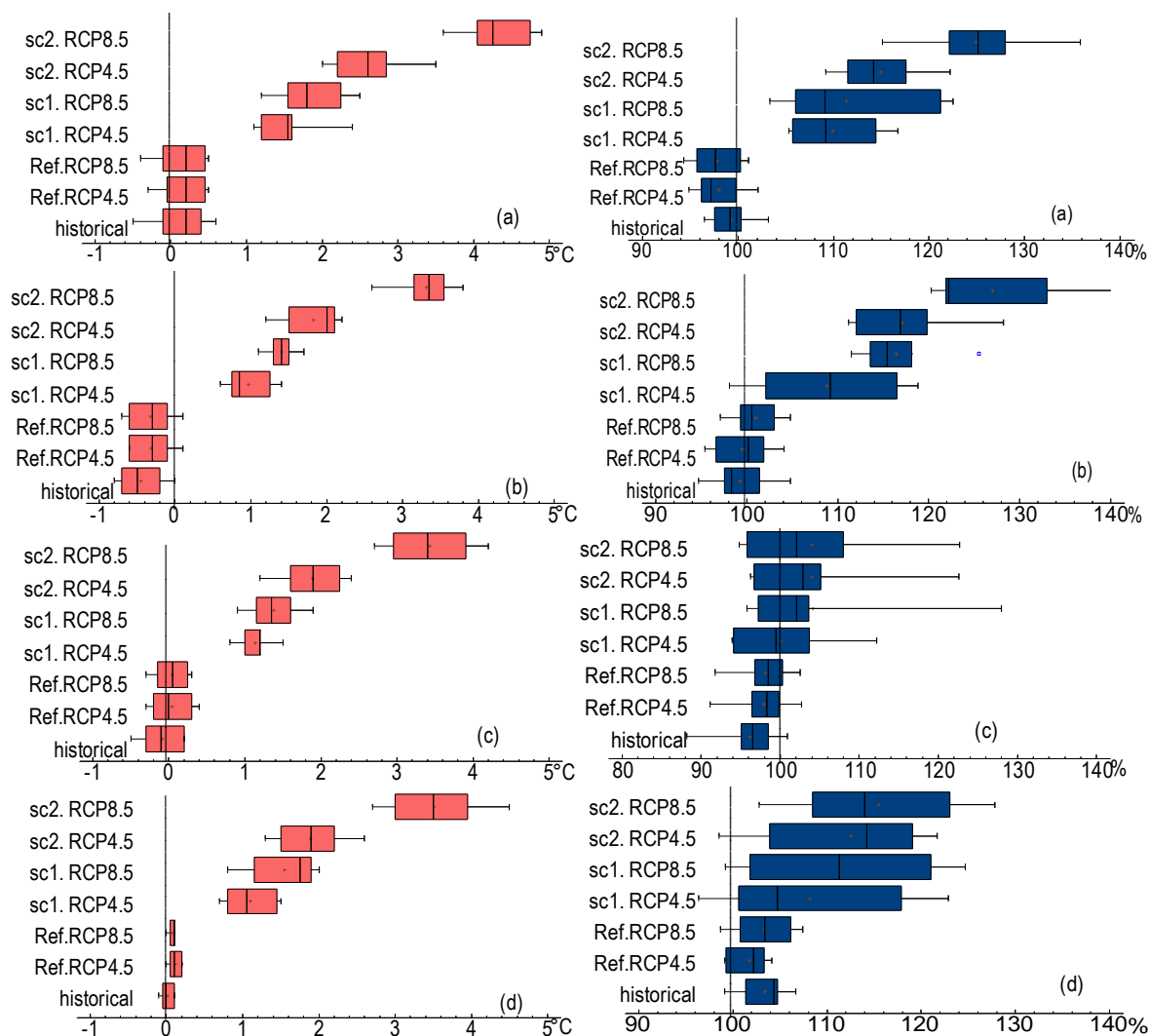
přerušení (1961 - 2100). Zvolené dva scénáře ukazují na stabilizaci koncentrace ekvivalentního CO₂ na konci 21. století na nižší úrovni 538 ppm, čemuž odpovídá radiační nárůst 4,5 W.m⁻² (RCP4.5). RCP8.5 předpokládá nejvyšší nárůsty koncentrací skleníkových plynů, z čehož plyne nejvýraznější změna klimatu počítající s kontinuálním nárůstem koncentrací ekvivalentního CO₂, které by mělo dosáhnout na konci našeho století koncentrace 936 ppm, čemuž odpovídá zesílení radiačního působení o 8,5 W.m⁻². Dále z celkem 40 GCM, které jsou v současné době k dispozici, bylo vybráno 5 modelů, které reprezentují celou šíři klimatického spektra (Štěpánek et al. 2016): (1) IPSL model pocházející z Francie a reprezentující medián všech testovaných GCM nejlépe; (2) HadGEM je vytvořený ve Velké Británii a reprezentuje výraznější změnu rozložení srážek v našem regionu (úbytek letních a podzimních srážek a nárůst jarních srážek); (3) CNRM původem z Francie predikující podobnou změnou teplot jako HadGEM, ovšem s nárůstem srážek ve všech měsících, zejména pak na jaře a na podzim; (4) BNU model (verze ESM) vytvořený v Číně a reprezentující globální klimatické modely, předpovídající pro území ČR relativně nižší nárůst teploty a redukci srážek ve všech měsících kromě léta; (5) MRI pocházející z Japonska, který předpovídá pro ČR, v porovnání s dalšími GC modely, relativně nižší nárůst teploty a nárůst srážek s výjimkou konce léta a podzimu. Získané simulace (CNRM-CM5-ALADIN53, CNRM-CM5-RCA4, IPSL-CM5A-MR-RCA4, EC-Earth RCA4, MOHC-HadGem2-ES_RCA4, MPI-ESM-LR_RCA4, EC-Earth HIRHAM5 a EC-Earth RACMO22e) prošly korekcí na chybu (bias) modelu.

Výsledky

Projekce možného vývoje sucha v průběhu 21. století

Při vytváření scénářů změny klimatu je nutné vzít v úvahu, že výstupy modelů pro referenční období vykazují chyby. Proto je nutné modelové výstupy před použitím upravit. Podrobná analýza teploty vzduchu a srážek pro historické i budoucí běhy regionálních klimatických modelů z aktivity Euro-CORDEX byla provedena Štěpánkem et al. (2016). Prvním krokem bylo ověřit schopnost všech modelů a simulovat měsíční teplotu vzduchu a měsíční úhrn srážek porovnáním modelové simulace s daty staničního pozorování. Změny v měsíčním, sezónním a ročním chodu teploty vzduchu a srážkových úhrnů byly analyzovány na základě porovnání modelových simulací prováděných podle jednotlivých modelů a scénářů pro období 2041 - 2070 resp. 2071 - 2100 a referenční období 1981 - 2010. Byly analyzovány výsledky RCM pro historická období, výsledky RCM řízenými globálními modely pro současné klima a také bylo provedeno porovnání s daty historickými, včetně zhodnocení

zdrojů chyb. Validace modelů pro historické období 1981 - 2010 byla provedena porovnáváním výsledků s pozorovanými hodnotami klimatických veličin, reprezentujících reálné hodnoty. Většina z vybraných nekorigovaných modelů nadhodnocuje srážky a podhodnocuje teploty vzduchu (rozdíly jsou i více než 2 °C) na území ČR ve všech výškových pásmech (modely jsou obecně vlhčí a chladnější).



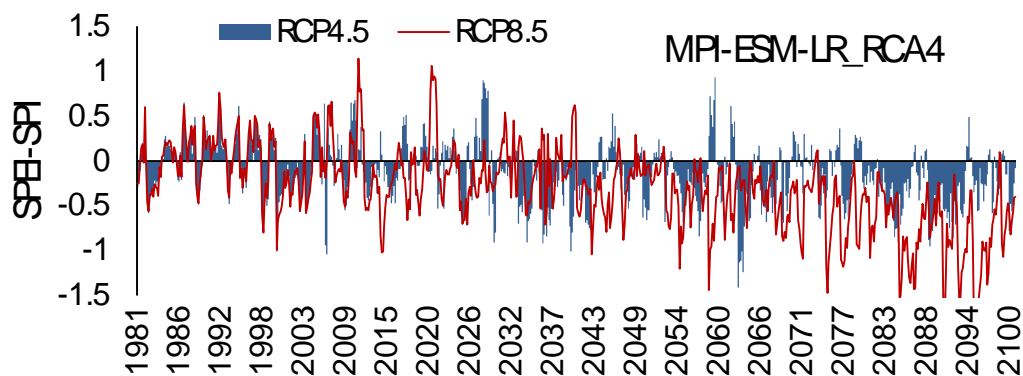
Obr. 2 Modelovaná změna průměrné teploty vzduchu a úhrnu srážek podle scénáře RCP4.5 a RCP8.5 pro jednotlivá roční období (a - zima; b - jaro, c - léto, d - podzim) a časové horizonty (sc1. 2041 - 2070 resp. sc2. 2071 - 2100 s referenčním obdobím 1981 - 2010 (Ref)) na území ČR.

Z nových dostupných korigovaných modelů Euro-CORDEX vyplývá, že do roku 2050 stoupne teplota vzduchu zhruba o 1 °C oproti období 1981 - 2010, avšak na konci století dojde dle RCP4.5 ke zvýšení průměrné roční teploty vzduchu o 2,0 °C, resp. o 4,1 °C dle RCP8.5. V rámci jednotlivých sezón má dojít k největší změně v zimním období. Ke konci století pak bude podle RCP8.5 nárůst teploty vzduchu v zimě až o 4,9 °C (obr. 2). U ročního

úhrnu srážek dojde k navýšení od 7 % (2021 - 2040) do 13 % (konec 21. století) pro RCP4.5, a od 6 % do 16 % pro RCP8.5. Největší změna nastane v zimě, kdy ke konci století dojde k navýšení o 35 %, nejmenší změna je pak očekávána v letních měsících. Pro Českou republiku se nejnovější výstupy klimatických modelů (Euro-CORDEX) shodují, že bude nadále docházet k nárůstu teploty vzduchu, a to v závislosti emisním scénáři. Do roku 2050 bude nárůst teploty stejný bez ohledu na emisní scénáře, jelikož krajina již nestihne reagovat na změny koncentrací skleníkových plynů. Avšak vývoj teploty v druhé polovině století je již na daném emisním scénáři závislý. Predikce klimatických modelů do budoucna se ve srážkových úhrnech shodují se současným stavem. Tedy bude převládat velká variabilita nad prokazatelným trendem. V posledních letech je zvláště pozorován rozdíl v redistribuci srážek. Roste množství intenzivních dešťů, převážně v létě, spojený s konvektivní činností a oproti tomu se prodlužují bezsrážková období.

S ohledem na stopy změny klimatu, přítomné v jednotlivých modelových výsledcích jsme zjistili, že korigovaný RCA4 model je nejcitlivější ke změně teploty ze všech modelů a systematicky vykazuje nejvyšší nárůst teploty. Tento model nabízí tři ze čtyř nejvyšších nárůstů teploty vzduchu v letním období pro oba scénáře a to bez ohledu na řídicí data z globálního klimatického modelu. Další model s nejvyšším nárůstem teploty je ALADIN v5.3, řízen pouze daty globálního klimatického modelu CNRM-CM5. Model ALADIN v5.3 je také nejvlhčí mezi zkoumanými simulacemi. Jeho projekce zvyšuje letní srážky až o 25 % oproti současnému stavu. Ostatní modely neukazují na výrazné změny a promítají pouze nepatrné odchylky srážek do 5 % v obou směrech, tedy vlhké i suché. Tento závěr platí pro oba zkoumané scénáře. Tyto změny se pak odrážejí i do výpočtu indexu SPEI a SPI.

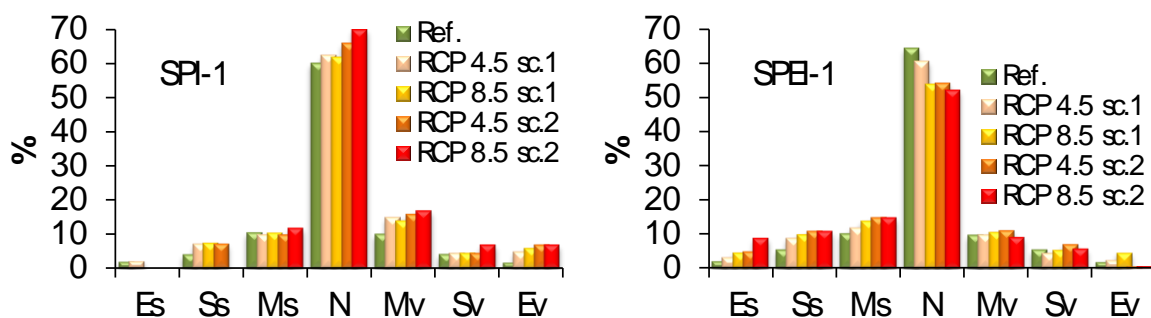
Projekce možného vývoje sucha v průběhu 21. století byly provedeny s použitím 8 regionálních klimatických modelů podle dvou emisních scénářů, RCP4.5 a RCP8.5 (obr. 3). Při vzájemném srovnání vykazují indexy SPEI a SPI značné rozdíly v míře závažnosti sucha a četnosti jeho výskytu pro budoucí časové horizonty. Dle projekce indexu SPEI může vést navýšení teploty vzduchu a změna srážkového režimu k častějšímu výskytu a vyšší intenzitě sucha.



Obr. 3 Časový vývoj rozdílů mezi SPI a SPEI v kumulativním intervalu 6 měsíců (od ledna do prosince) v pozorovaném (1961 - 2005) a simulovaném (2006 - 2100) období na základě RCP4.5 a RCP8.5 (např. dle MPI-ESM-LR_RCA4) v nížinné oblasti.

Projekce četnosti výskytu sucha ve vegetačním období

Očekává se, že vyšší teplota v rámci RCP8.5 (obvykle spojena s vyšší mírou evapotranspirace) povede ke zvýšení četnosti sucha. Nicméně, je zde také predikováno zvýšení množství srážek pro celé území, které by mohlo snížit vliv zvyšování teplot. Pro střed 21. století (sc1. 2041 - 2070) vykazují oba indexy malé změny v četnosti sucha mezi oběma scénáři; při použití SPEI-6 (SPI-6) na základě RCP4.5 se očekává, že se sucho bude vyskytovat v kategoriích: mírné sucho, silné sucho a extrémní sucho v 22 % (19,4 %), 21 % (17,6 %) a 18 % (16,4 %) v nižších, středních a vyšších polohách. Avšak, většina hodnot indexu SPI dle scénáře koncentrace RCP4.5 a RCP8.5 (sc1.) spadá do kategorie normálu v rozmezí od 59,0 do 72,5 %. Ke konci 21. století (2071 - 2100) ukazuje SPI u obou scénářů procentuální pokles výskytu suchých episod v průběhu vegetačního období oproti současnému stavu, ovšem s výrazným nárůstem v kategoriích silné a extrémní vlhké episody ve všech třech regionech. To znamená, že většina modelů předpokládá dle SPI vlhčí podmínky. Naopak, SPEI u scénářů RCP4.5 a RCP8.5 predikuje tendenci k častějšímu výskytu suchých episod a výskyt extrémně suchých událostí, které budou převládat nad výskytem událostí extrémně vlhkých. Navíc SPEI vykazuje, v porovnání s SPI, větší frekvenci ve vlhkostní kategorii silné sucho a současně předpovídá méně událostí v kategorii silné vlhko. U scénáře RCP8.5 (predikující nejvyšší nárůst teploty) pro konec 21. století (sc2.) spadá téměř 27,3 % hodnot SPEI do kategorie suchých podmínek. Naopak pouze 5,6 % případů v tomto časovém období jsou dle SPEI hodnoceny jako abnormálně vlhké podmínky. Tato progrese výskytu sucha je indukována zvýšením teploty způsobené RCP8.5 a teplotní citlivostí tohoto indexu. Dle SPEI lze tedy na konci 20. století očekávat v nížinách více než dvojnásobný nárůst extrémního sucha a extrémně vlhkých epizod ve vegetačním období. Mediány všech modelů četnosti sucha na regionální úrovni jsou shrnuty v obrázku 4.



Obr. 4 Četnost vláhových kategorií ve vegetačním období (medián ansámblů,%) pro referenční období (Ref. 1981 - 2010) a dvě budoucí období (sc.1: 2041 - 2070 a sc.2: 2071 - 2100) v rámci scénářů RCP4.5 a RCP8.5 (v nížinách). Vláhové kategorie: Es - extrémní sucho, Ss - silné sucho, Ms - mírné sucho, N - normální, Mv – mírné vlhko, Sv – silné vlhko a Ev - extrémní vlhko.

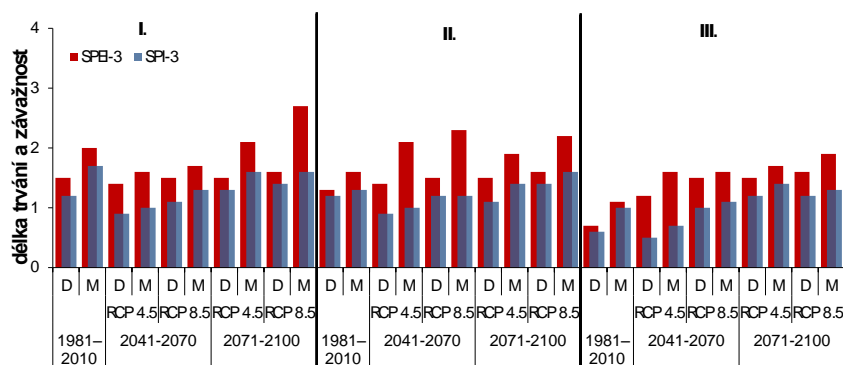
Projekce délky trvání sucha a jeho závažnost ve vegetačním období

Délka trvání a míra závažnosti sucha jsou klíčovými faktory ve vegetačním období zemědělských plodin. Závažnost sucha byla vypočítána jako absolutní součet hodnot SPI (SPEI) za celou délku zaznamenaného sucha během vegetačního období pro každou oblast. Doba trvání sucha byla počítána jako konsektivní počet suchých měsíců během vegetačního období. Mediány všech modelu délky trvání (D) a závažnosti meteorologického sucha (M) na regionální úrovni jsou shrnuty v obrázku 5. Experimenty Euro-CORDEX předpovídají, bez ohledu na scénáře koncentrací CO₂, nižší četnost sucha a delší trvání při přechodu z meteorologického sucha přes půdní sucho do hydrologického sucha. S rostoucí délkou trvání se snižuje četnost suchých měsíců a dochází ke zvýšení závažnosti sucha v období duben-září. V současném klimatu hodnotí oba použité indexy délku trvání a míru závažnosti sucha shodně, kdežto při projekci do budoucna se rozdíly mezi použitými indexy zvyšují u délky trvání i u závažnosti sucha. Při analýze současného období je patrný výraznější pokles délky sucha s rostoucí nadmořskou výškou v porovnání s relativně stabilní mírou závažnosti sucha. Při projekci klimatických modelů do budoucna dochází při použití obou indexů k mírnému nárůstu doby trvání i míry závažnosti, a to rovnoměrně s malými rozdíly v jednotlivých nadmořských výškách. Vliv RCP na délku trvání a závažnost meteorologického sucha je zanedbatelný ve všech sledovaných oblastech. Při hodnocení délky trvání a závažnosti meteorologického sucha nejsou patrné výrazné rozdíly v jednotlivých oblastech v počtu suchých měsíců během vegetačního období, avšak při podrobnější analýze jsou v nížinách lokalizována sucha převážně na počátku vegetačního období oproti vrchovinám, kde jsou sucha koncentrována do druhé poloviny vegetačního období. Počet měsíců tedy zůstává u obou oblastí stejný, ale dochází pouze k posunu výskytu sucha v druhé oblasti do pozdějších fází vegetačního období. V letech 2041 - 2070 v rámci RCP4.5 dosahuje délka trvání a

závažnost sucha podle SPI nižších hodnot u všech typů sucha ve všech oblastech v porovnání s referenčním obdobím. Pro 2041 - 2070 a 2071 - 2100, v případě zemědělského sucha, predikují modely dle indexu SPI pokles délky trvání a závažnosti sucha v prvních dvou oblastech. Pro hydrologické sucho se s rostoucí nadmořskou výškou výrazně zvyšuje variabilita jeho délky trvání a závažnosti pro index SPI v porovnání s indexem SPEI, kde je variabilita na nadmořské výšce nezávislá. V nížinách, v případě hydrologického sucha, jsou výrazné rozdíly mezi použitými indexy ve stupni jeho závažnosti, kde hodnota u SPEI dvojnásobně převyšuje hodnotu u SPI, a to nezávisle na RCP.

Dodatečně byl, pro budoucí období (2041 - 2070 a 2071 - 2100) dle scénáře RCP4.5 a RCP8.5 v porovnání s referenčním obdobím 1981 - 2010 a historickým během (CtI. 1981 - 2010), analyzován počet nejsušších vegetačních období (SPEI-6), a to na základě simulace 8 regionálních klimatických modelů. Pro každý model byla analýza provedena zvlášť a následně byl vypočten medián ze všech modelů pro každou stanici. Výsledky počtu nejsušších vegetačních období za 30 let pro každou simulaci jasně ukazují, že RCA4 vykazuje podobné změny v počtu výskytu sucha jako MOHC-HadGem2-ES_RCA4 a CNRM-CM RCA4. Tyto dva experimenty mají tendenci nadhodnocovat výskyt sucha, zatímco ALADIN53 má tendenci spíše podhodnocovat. Pro srovnání, tyto výsledky naznačují, že medián počtu nejsušších vegetačních období za 30 let pro historické simulace dle nejvlhčího modelu (ALADIN53) a nejsuššího (RCA4) se pohybují od 1,9 do 5,7 událostí. Budoucí odhady ukazují, že dopady klimatické změny budou s časem závažnější. Výstupy naznačují, že v blízké budoucnosti dojde k větší shodě mezi modely.

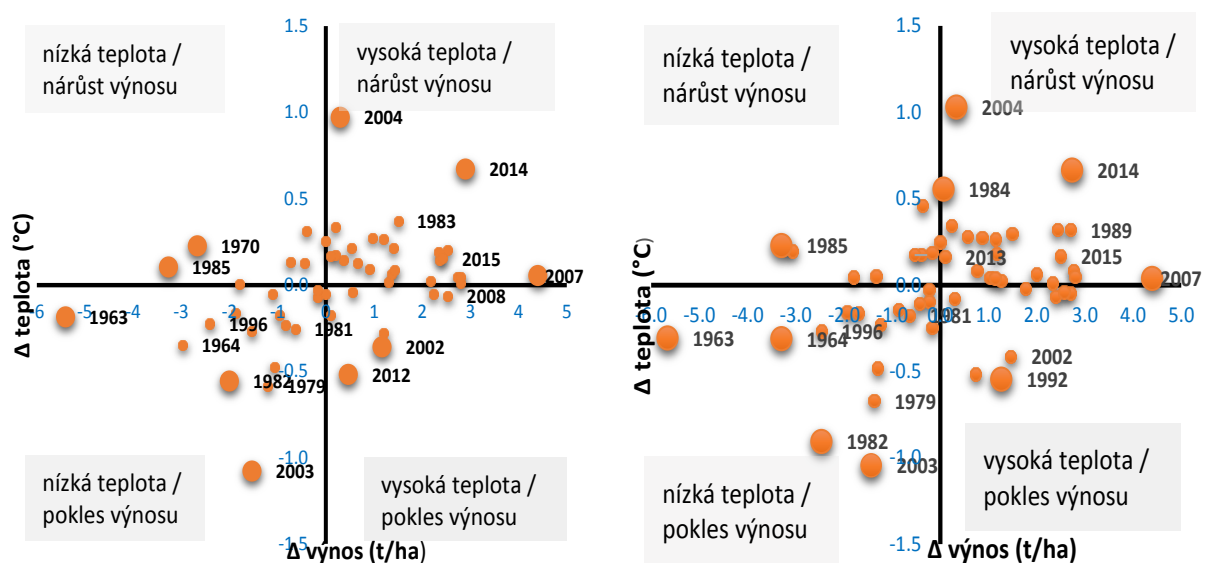
Dále byla zkoumána změna mediánu počtu nejsušších vegetačních období a jejich distribuce vzhledem k nadmořské výšce 184 stanic po dobu dvou budoucích období v rámci dvou scénářů koncentrací CO₂ s využitím sušších a vlhčích modelů.



Obr. 5 Medián ansámblů délky trvání (D) a závažnosti sucha (M) na regionální úrovni pro referenční období (Ref. 1981 - 2010) a dvě budoucí období (sc.1: 2041 - 2070 a sc.2: 2071 - 2100) v rámci scénářů RCP4.5 a RCP8.5 v nižších (I), středních (II) a vyšších (III) polohách.

Ozimá řepka jako modelová plodina

Z výsledků v obr. 6 vyplývá, že labilita výnosů v závislosti na odchylce teploty vzduchu v zimním období vykazuje stejné tendence v rámci lokality Středočeského kraje jako v souhrnu za celou ČR. Nejvýraznější ztráta výnosu řepky nastala v obou případech v letech 2003. Další výnosově slabé ročníky ve Středočeském kraji byly roky 1982, 1979 a 2011. Nejnižší odchylka teploty vzduchu v zimním období byla určena v roce 1963, avšak snížení výnosů nebylo tak výrazné. Nejteplejším zimním obdobím byla v obou případech zima 2007 (2006/2007), kdy odchylka teploty vzduchu v rámci Středočeského kraje i ČR přesáhla hodnotu 4,0 °C. Tento ročník byl však výnosově normální. Ozimá řepka byla vybrána jako modelová plodina, neboť je citlivá jak na holomrazy a srážkový deficit v chladném období roku, tak na sucha ve vegetačním období. V porovnání s ozimými obilovinami má nejnižší odolnost vůči holomrazům. U ozimých obilovin se odolnost vůči holomrazům pohybuje od -22,0 °C u ozimého žita, přes -20,0 °C u oz. pšenice k -12,0 °C u dvouřadého ozimého ječmene (Vašák a Mikšík, 2002). Řepka ozimá snáší holomrazy v závislosti na stupni svého vývoje.



Obr. 6 Analýza odchylky teploty vzduchu v zimním období (prosinec, leden a únor) a odchylky výnosu ozimé řepky v letech 1961 - 2015 ve Středočeském kraji (vpravo) a České republice (vlevo).

Jak uvádí Vašák a Mikšík (2002) slabé rostliny řepky s kořenovým krčkem o síle do 5 mm vydrží holomrazy kolem -12,0 °C. Mráz kolem -14,0 °C ničí rostliny vytažené, které již na podzim vytvořily základ stonku. Odolnost rostlin vůči mrazu postupně klesá od ledna do dubna z -16,0 °C na zhruba -9,0 °C. Velice nebezpečným faktorem pro přezimování řepky je ledový škrálop na sněhu, pod kterým řepka vydrží přibližně dva týdny. Naopak nepoškozená

a postupně tající sněhová pokrývka je významným zdrojem vláhy pro start vegetace v jarním období. Zima s dlouhotrvající sněhovou pokrývkou a silnými mrazy byla v roce 1996, jak je patrné z obr. 6, je tato zima pátá nejchladnější za sledované období (1961 - 2016) a s ohledem na izolační vlastnosti sněhové pokrývky bylo snížení výnosů jen mírné. Jak uvádí Prášil a Prášilová (2002) byla zima 1979 (1978/1979) typická výraznými výkyvy teploty vzduchu z kladných do silně záporných hodnot nižších než $-18,0$ až $-20,0$ °C, a to často bez sněhové pokrývky. Dle výnosové analýzy obr. 6 byl tento rok (po roce 2003) druhý výnosově nejztrátovější.

Diskuze

Změny v riziku výskytu sucha dle SPEI a SPI vyplývají ze změn teploty vzduchu (evapotranspirace) a srážek. Rostoucí teplota vzduchu (podporující riziko sucha) společně s nevýraznou změnou v množství srážek bude vést k nárůstu rizika sucha ve vegetačním období zemědělských plodin v nížinných oblastech ČR. Přesto, že simulace predikují nárůst srážek na území ČR, lze očekávat větší tendence k výskytu sucha, a to i podle nových scénářů a modelů. Toto lze přičítat výrazné variabilitě srážek a jejich statisticky nevýznamnému růstu v ročních sumách. To znamená, že se množství ročních srážek příliš nezmění, ale poroste jejich extremita. Kromě toho jsou změny v blízké budoucnosti zatíženy vyšší mezi-modelovou variabilitou zejména u srážek, kde je toto zatížení mnohem větší, než u změny teploty (Holtanová a Kalvová, 2015). Tím pádem se přepokládá větší neurčitost v predikci sucha dle SPI než SPEI. Dle získaných výsledků můžeme konstatovat, že výběr indexu sucha může ovlivnit výsledek posouzení dopadů změny klimatu na sucho a použití pouze jednoho indexu nemusí přesně reprezentovat rozsah možných budoucích změn sucha. Vznik, šíření a závažnost půdního sucha úzce souvisí se změnami ve využívání půd. Dle Taylora et al. (2013) může zvýšená koncentrace CO_2 přispět ke snížení rizika vzniku sucha, neboť snížení vodivosti průduchů, způsobené saturací rostliny CO_2 , povede ke snížení transpirace.

Dle pozorovaného a simulovaného SPI a SPEI, sucho v roce 2015 bylo v ČR jedním z nejhorších za posledních 20 let, zatímco letní sucho 2015 v Evropě (Orth et al. 2016) je jedno z nejhorších za posledních 115 let a očekává se, že podle scénáře RCP4.5 nastane jedenkrát za 20 let a jedenkrát za 6 let podle scénáře RCP8.5. Orth et al. (2016) prokázali, že z hlediska srážkových a teplotních anomálií, je letní sucho 2015 ve střední Evropě svým charakterem spíše typické pro podnebí středomořských oblastí. Tato událost je v souladu s předpokládaným zvýšením frekvence trvání a závažnosti sucha ve střední Evropě v budoucnu. Navíc, v roce 2015, Štěpánek et al. (2016) identifikovali v ČR 35-40 tropických dnů, což bylo

více, než predikuje většina modelů Euro-CORDEX do konce 21. století. Obdobně zjistili Lhotka et al. (2017) dle modelů Euro-CORDEX, podstatný nárůst frekvence vln veder, což má souvislost s radiačním působením v rámci RCP8.5. Tři až čtyři vlny veder za léto jsou predikovány pro konec 21. století (ve srovnání s méně než jednou vlnou v současném klimatu) a závažné vlny veder se pravděpodobně stanou pravidelným jevem.

Řepka je na vodu poměrně náročná plodina, pro výnos 3,5 t/ha potřebuje přibližně 300 – 350 mm srážek. Na řepku působí nepříznivě dlouhotrvající sucho na podzim nebo na jaře. Řepka vyžaduje rovnoměrně rozložené srážky během vegetace. Je-li podzim příliš vlhký, vytvářejí se křehká vodnatá pletiva, která se snadno poškodí mrazem. Nadměrné srážky v době kvetení brání úspěšnému opylení rostlin a snižují výnos semen. Jestliže nastanou dlouhotrvající sucha v období tvorby semen, dochází k zasychání šesulí, semena se scvrkávají a jsou drobná. Vzhledem k probíhajícím změnám klimatu, jsou podle současných poznatků odvozeny pro produkci ozimé řepky následující požadavky: větší využití prodloužené fáze tvorby semen; šlechtění odrůd s delší vegetační dobou (k vyrovnání dopadů poklesu srážek v letním období); tvorba odrůd s vyšší tolerancí k suchu (k zabránění předčasného přechodu z vegetativní do generativní fáze před začátkem zimního klidu); zaměření na výzkum výskytu chorob a škůdců a další vývoj systémů zpracování půdy, které šetří vodu.

Závěr

Hlavní výsledky lze shrnout následovně: (i) projekce indexu SPI má tendenci vykazovat významné snížení suchých událostí, zatímco projekce indexu SPEI má tendenci opačnou, tedy vykazovat nárůst počtu suchých epizod. Odhady projekce sucha do budoucnosti dle SPI mají tendenci podceňovat rizika sucha, zatímco závažnost sucha dle SPEI se do konce tohoto století zvyšuje, a to i při mírném navýšení srážek. (ii) Nejvyšší četnost silného a extrémního sucha je detekována dle SPEI v rámci RCP8.5 na konci 21. století v rozmezím od 3,8-10,4 % v nížinách a 3,6-9,4 % ve vrchovinách. Narůst v délce trvání suchých period v rámci vegetačního období napomůže vysvětlit pokles výskytu sucha v těchto regionech, protože značné navýšení jejich trvání má tendenci snižovat počet jednotlivých výskytů. (iii) U míry závažnosti hydrologického sucha v nížinách se podle SPEI předpokládá, že pravděpodobně dojde k téměř dvojnásobnému navýšení ve srovnání s SPI. (iv) Analýzy Euro-CORDEX předpovídají (bez ohledu na scénáře koncentrací CO₂) snížení počtu suchých epizod, které ale budou delší a budou přecházet z meteorologického sucha přes půdní na hydrologické, což může negativně ovlivnit stabilitu zemědělské výroby, růst dřeva, hladinu řek a zásoby vody. (v) Podle nejsušších a nejvlhčích modelů, jsou změny nejvýraznější pro scénář RCP8.5 v

oblastech s nadmořskou výškou do 400 m. O něco méně změn je predikováno v nadmořských výškách mezi 401 a 700 m. (vi) Vláhová bilance se během vegetačního období posune v nížinných oblastech k mírně suché a v horských oblastech do vlhké, u vrchovin nejsou tyto změny tak patrné.

Literatura

- Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome, Italy.
- Brázdil R., Trnka M. (eds). 2015. *Drought in the Czech Lands: past, present and future*. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i.: Brno, Czech Rep., 402 pp.
- Holtanová E., Kalvová J. 2015. Neurčitosti výstupů regionálních klimatických modelů. *Meteorologické Zprávy*. 68: 116-123.
- Lhotka O., Kyselý J., Farda A. 2017. Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theor. Appl. Climatol.* doi:10.1007/s00704-016-2031-3.
- Loon van A.F., Gleeson T., Clarck J., Van Dijk A.I.J.M., Stahl K., Hannafjord J., Teuling A., Tallaksen L.M., Uijlenhoet R., Hannah D.M., Sheffield J., Svoboda M., Verbeiren B., Wagener T., Rangelcroft S., Wanders N., Van Lanen H.A.J. 2016. Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience* 9: 89-91. doi:10.1038/ngeo2646.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, MA, 179-183.
- Orth R., Zscheischler J., Seneviratne S.I. 2016. Record dry summer in 2015 challenges precipitation projections in Central Europe. *Scientific Reports* 6: doi:10.1038/srep28334.
- Potopová V., Boroneat C., Možný M., Soukup J. 2016. Driving role of snow cover on soil moisture and drought developing during the growing season in the Czech Republic. *Int. J. Climatol.* 36 (11): 3741-3758.
- Potopová V., Štěpánek P., Zahradníček P., Farda A., Türkött L., Soukup J. 2017. Projected changes in the evolution of drought on various time scales over the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. (in processing)
- Prášil I., Prášilová P. 2002. Mrazuvzdornost a přezimování řepky. *Úroda*. 2002 (1): 34-35.
- Štěpánek P., Zahradníček P., Farda A. 2013. Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961-2010. *Időjárás*. 117 (1): 123-141.

- Štěpánek P., Zahradníček P., Farda A., Skalák P., Trnka M., Meitner J., Rajdl K. 2016. Projection of drought-inducing climate conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *Clim. Res.* 70: 179-193.
- Taylor I.H., Burke E., McColl L., Falloon P.D., Harris G.R., McNeall D. 2013. The impact of climate mitigation on projections of future drought. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 2339-2358. doi:10.5194/hess-17-2339-2013.
- Vašák J., Mikšík V. 2002. Přezimování řepky v roce 2002. *Úroda.* 2002 (2): 33.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23: 1696-1718.

Poděkování

Autoři děkují mezinárodnímu projektu IMDROFLOOD (Improving Drought and Flood Early Warning, Forecasting and Mitigation using real-time hydroclimatic indicators). Tento článek byl vytvořen za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I, číslo projektu LO1415 a Systém pro monitoring a předpověď dopadů zemědělského sucha (QJ1610072).

Kontakt:

Dr. Mgr. Vera Potopová
Česká zemědělská univerzita v Praze, FAPPZ, KAB
Kamýcká 129, 165 21 Praha 6- Suchbátka
potop@af.czu.cz