

Vývoj a využití stochastických meteorologických generátorů v Česku

Development and use of stochastic weather generators in Czechia

Martin Dubrovský

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení klimatologie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Ústav výzkumu globální změny AV ČR
Bělidla 986/4a, 603 00 Brno
✉ dub@ufa.cas.cz

Radan Huth

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení klimatologie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie
Albertov 6, 128 43 Praha 2

Miroslav Trnka

Ústav výzkumu globální změny AV ČR
Bělidla 986/4a, 603 00 Brno;
Mendelova univerzita
Ústav agrosystémů a bioklimatologie
Zemědělská 1, 613 00 Brno

The paper presents stochastic weather generators (WGs) being developed in Czechia since 1994. These generators have been designed especially for use in agroclimatic and hydrological modelling. They include parametric single-site daily Met&Roll and M&Rfi weather generators, non-parametric daily GOMEZ generator, semi-parametric hourly HOWGH generator, and parametric spatial SPAGETTA generator. All these generators allow producing synthetic weather series of up to 8 meteorological variables. The paper provides an overview of the generators and shows selected results demonstrating possible applications of the generators – especially while analysing potential impacts of climate change on weather-dependent processes. The particular attention is paid to coupling of the generators with Regional and Global Climate Models (RCMs and GCMs). Firstly, climate change scenarios derived from these models may be used to modify WG parameters so that the generators may produce weather series representing the future climate. Secondly, the WGs may be used in a sensitivity analysis, in which the separate effects of changes (projected by RCMs or GCMs) in various characteristics of individual meteorological variables are assessed.

KLÍČOVÁ SLOVA: generátory meteorologické – modely stochastické – dopady změny klimatu – analýza citlivostní – modely klimatické globální – modely klimatické regionální – modely růstové – modely hydrologické

KEYWORDS: weather generators – stochastic models – climate change impacts – sensitivity analysis – global climate models – regional climate models – crop models – hydrological models

1. Úvod

Při výzkumu dopadů změny klimatu (ZK) jsou využívány různé modely (např. agrometeorologické růstové modely a hydrologické srážko-odtokové modely), které ke svým simulacím potřebují časové vícerozměrné meteorologické řady reprezentující současné i budoucí klima v jedné či více lokalitách. K tvorbě těchto řad bývá použit: (1) regionální klimatický model (RCM), (2) stochastický meteorologický generátor (WG), případně (3) statistický downscaling či (4) metoda tzv. přímé modifikace pozorovaných dat. Každá z těchto metod umožňuje produkovat požadované řady a každá má své výhody i nevýhody. V tomto článku se soustředíme na stochastické generátory vyvíjené v Česku od roku 1994, přičemž v roli případného „protivníka“ či „spojence“ budou RCM modely.

Zřejmou výhodou RCM modelů je skutečnost, že jsou založeny na rovnicích reprezentujících fyzikální i chemické procesy v atmosféře, což znamená, že tyto modely poskytují fyzikálně konzistentní výstupy, tj. takové stavy atmosféry, které mohou reálně nastat. RCM modely mohou simulovat časové řady meteorologických proměnných v uzlových bodech libovolné omezené oblasti v libovolném historickém i budoucím období, pro něž jsou k dispozici „řídící“ data, což jsou buď reanalýzy nebo výstupy z GCM (globální klimatický model), ze kterého se do RCM dostává signál ZK odpovídající zvolenému emisnímu scénáři. Vzhledem ke složitosti použitých rovnic a nutnosti pracovat ve vysokém prostorovém i časovém rozlišení (mají-li být reprezentovány i procesy odehrávající se v menších měřítkách, např. konvekce) může simulace dostatečně dlouhé časové řady trvat týdny či měsíce.

Na rozdíl od RCM jsou generátory založeny na stochasticko-statistickém modelování (často se používají Markovovy řetězce a autoregresní modely), přičemž parametry použitých modelů jsou odhadnuty z „kalibračních“ časových dat (obvykle se jedná o pozorovaná data). Důležitými charakteristikami generátoru jsou (a) typ metodologie: generátor může být parametrický, neparametrický (založený na resamplingu) nebo semi-parametrický (mix parametrických i neparametrických modelů); (b) počet meteorologických proměnných: existují jednorozměrné generátory zaměřující se na jedinou proměnnou, nejčastěji jsou však používány 4 až 6-rozměrné generátory; (c) časový krok: generátory nejčastěji pracují s denním

krokem, existují však i generátory hodinových či ročních časových řad; (d) prostorová struktura: generátory jsou buď jednostaniční (pouze pro jednu lokalitu), anebo prostorové či více-staniční (pro více stanic či uzlových bodů, přičemž generátor se snaží o zachování nejen časové, ale i prostorové struktury časových řad). Specifikace těchto charakteristik závisí zejména na účelu, kterému má generátor v daném experimentu sloužit. Pro agrometeorologické modely jsou většinou používány jednostaniční vícerozměrné denní generátory; požadované meteorologické proměnné zpravidla zahrnují denní sumu globální sluneční radiace, denní minimální a maximální teplotu, denní úhrn srážek a někdy i vlhkost vzduchu (relativní či absolutní) a rychlost větru. Pro hydrologické modely jsou používány většinou více-staniční časové řady několika prvků; požadované časové řady mají obvykle též jednodenní časový krok, v některých experimentech je však vyžadován kratší (např. hodinový) krok. Poté, co je generátor kalibrován, může vytvořit (rychlostí výrazně vyšší než při použití RCM) libovolný počet realizací časových řad se strukturou statisticky podobnou kalibračním řadům. Je-li třeba vygenerovat řady reprezentující budoucí klima, jsou parametry generátoru modifikovány pomocí scénářů ZK zpravidla odvozených z výstupů globálních či regionálních klimatických modelů. Hlavní výhody generátorů jsou: (1) výrazně vyšší (vzhledem k RCM) rychlost tvorby řad s podstatně nižšími nároky na výpočetní techniku dovoluje pro danou kombinaci lokalita-emisní scénář-letopočet vygenerovat libovolný počet realizací syntetických řad, což umožňuje provést pravděpodobnostní odhad dopadu změn klimatu. (2) Generátory mohou produkovat řady reprezentující i takové emisní scénáře, pro které nejsou k dispozici simulace konkrétním RCM (či GCM) modelem – scénáře ZK pro modifikaci parametrů generátoru lze vytvořit aplikací metody pattern scaling (Dubrovský et al. 2005) na scénář odvozený ze simulace provedené modelem RCM (či GCM) pro jiný emisní scénář. (3) Při generování řad reprezentujících budoucí klima lze selektivně modifikovat jen některé parametry generátoru (je-li možné změny těchto parametrů odvodit z RCM či GCM výstupů; např. pravděpodobnost výskytu srážkových dnů, průměry a variabilitu jednotlivých meteorologických proměnných či jejich časoprostorové korelace) a provést odhad vlivu změn jednotlivých charakteristik časových řad.

Předmětem článku je stručný přehled vývoje stochastických generátorů a jejich využití v Česku. V kapitole 2 je shrnuta historie od roku 1994, kdy u nás vývoj generátorů začal. Kapitola 3 je zaměřena na poslední produkt, kterým je prostorový generátor SPAGETTA. Součástí článku jsou vybrané výsledky získané pomocí generátorů, které demonstrují jejich validitu a možnosti jejich využití. Jedny z posledních experimentů (obr. 4 a 5) ukazují, že generátory a RCM nemusí být vnímány jako soupeři, nýbrž jako dvě metodologie, které se vzájemně doplňují.

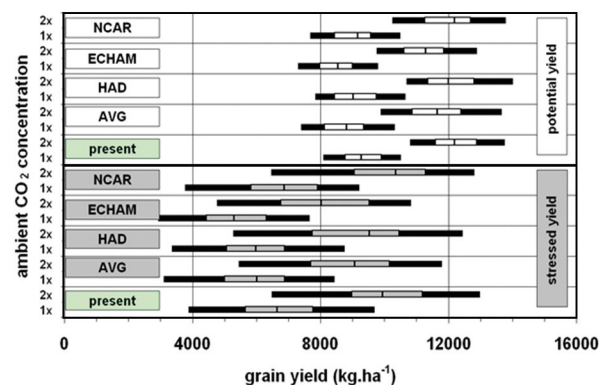
2. Vývoj stochastických meteorologických generátorů v Česku

2.1 Jednostaniční generátory

Vývoj generátorů v Česku začal v roce 1994, kdy byl pro projekt „Country Studies“ (Kalvová 1996; Brázdil a Rožnovský 1996) vytvořen parametrický jednostaniční denní generátor Met&Roll. Jednalo se o mírně „obohacenou“ verzi generátoru WGEN

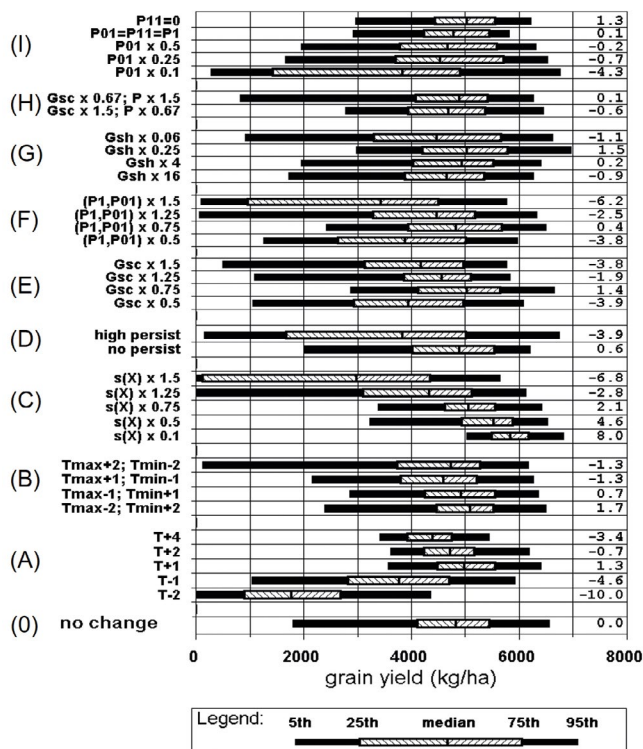
vyvinutého Richardsonem (1981), o jehož rozvoj se v dalších letech zasloužil Wilks (1992; 1998); tyto generátory se označují jako generátory „Richardsonova“ typu. Generátor používá Markovův řetězec prvního řádu k modelování výskytu srážek, gama rozdělení či smíšené exponenciální rozdělení pro generování denního úhrnu srážek (PREC) a časová řada zbývajících tří proměnných (minimální a maximální teplota vzduchu $T_{\min}$ a $T_{\max}$ a úhrn dopadajícího slunečního záření SRAD) je generována autoregresním modelem prvního řádu. První verze generátoru (Dubrovský 1996a; 1996b; 1997) nabízela spuštění tří procedur: 1. kalibrace generátoru; 2. modifikace parametrů generátoru podle zadaných scénářů změny klimatu (scénáře v té době zahrnovaly jen změny průměrných hodnot všech 4 meteorologických proměnných, tyto změny byly odvozeny z GCM simulací); 3. generování syntetických řad s použitím původních či modifikovaných parametrů generátoru. Začátkem 21. století byl generátor spřažen s měsíčním generátorem (který generoval časové řady měsíčních průměrů pomocí autoregresního modelu 1. řádu), což zlepšilo reprodukci některých klimatických charakteristik (zejména variability měsíčních průměrů) generovaných denním generátorem i kvalita výstupů z modelů získaných pomocí syntetických denních řad – konkrétně se výrazně zlepšila kvalita simulace extrémních průtoků hydrologickým modelem SAC-SMA (Dubrovský 2004).

V roce 2007 došlo k výrazným změnám generátoru Met&Roll. Způsob ovládání se změnil, možnosti generátoru byly rozšířeny a generátor byl přejmenován na M&Rf. Nově přidané prvky zahrnovaly například možnost použití kvantilové transformace umožňující generování výrazně „nenormálně“ rozdělených proměnných, jako jsou vlhkost vzduchu a rychlost větru.



Obr. 1 Potenciální a vodou a živinami limitované („stressed“) modelové výnosy jarního ječmene v lokalitě Kroměříž simulované modelem CERES-Barley pro současné klimatické podmínky a 4 scénáře změny klimatu podle 3 GCM modelů; AVG reprezentuje průměr ze 3 CGM scénářů a pro současnou a dvojnásobnou koncentraci CO₂ v atmosféře. Horizontální pruhy představují 5., 25., 50., 75. a 95. percentil z ročních výnosů simulovaných při použití 99letých denních meteorologických řad vytvořených generátorem Met&Roll (více viz Trnka et al. 2004).

Fig. 1. Potential and stressed model yields of spring barley simulated by the CERES-Barley model for the Kroměříž station for the present climate conditions and future GCMs-based climatic scenarios (3 CGM scenarios + average of these scenarios), and 1x CO₂ and 2x CO₂ ambient air concentrations. The horizontal bars represent the 5th, 25th (lower quartile), 50th (median), 75th (upper quartile), and 95th percentiles from a set of 99 yields simulated with use of 99-year synthetic daily weather series produced by the Met&Roll generator (see Trnka et al. 2004 for more details).

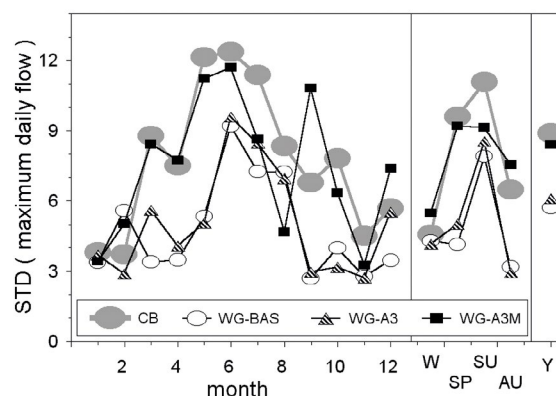


Obr. 2 Citlivost výnosů kukuřice simulovaných modelem CERES-Maize při použití syntetických meteorologických řad na změny vybraných parametrů generátoru. (O) parametry generátoru nezměněny; (A) změna průměrných teplot; (B) současná změna $T_{\min}$ a $T_{\max}$ (T_{avg} se nemění); (C) standardní odchylky teplot vynásobeny uvedeným faktorem; (D) autokorelace (lag = 1 den) mezi SRAD, $T_{\max}$ a $T_{\min}$ nastaveny na 0 („no persist“) či 0,9 („high persist“); (E) průměrné srážkové úhrny vynásobeny uvedeným faktorem, četnost výskytu srážkových dnů zůstává nezměněna; (F) pravděpodobnost výskytu srážek P1 i přechodová pravděpodobnost P01 změněna uvedeným faktorem; (G) parametr tvaru gama rozdělení změněn; (H) parametr měřítka gama rozdělení i pravděpodobnost výskytu srážek se mění, měsíční sumy srážek zachovány; (I) změni se přechodové pravděpodobnosti Markovova řetězce, četnost výskytu srážek zůstane zachována. Čísla u pravého okraje grafu jsou hodnoty Wilcoxonova testu porovnávajícího odchylku pravděpodobnostního rozdělení výnosů pro daný scénář od rozdělení výnosů pro scénář „no change“. (více viz Dubrovský et al. 2000; obr. 8).

Fig. 2. Sensitivity of maize yields simulated by the CERES-Maize model using synthetic weather series with changes in selected parameters of the Met&Roll generator. (O) no change in WG parameters; (A) change in temperature means; (B) $T_{\min}$ and $T_{\max}$ are changed while T_{avg} is preserved; (C) standard deviations of temperatures are multiplied by a given factor; (D) lag-1-day-autocorrelations between SRAD, $T_{\max}$ a $T_{\min}$ are set to 0 („no persist“) or 0.9 („high persist“); (E) mean precipitation sums are multiplied by a given factor while frequency of wet days is preserved; (F) probability of wet day occurrence and dry-to-wet transition probability are changed; (G) shape parameter of the Gamma distribution is modified; (H) scale parameter of the Gamma distribution and probability of wet day occurrence are modified while preserving precipitation sums; (I) transition probabilities of Markov chain are modified while probability of wet day occurrence remains unchanged. The numbers to the right of each bar are values of the standardized Wilcoxon statistics for testing the hypothesis that the distribution of grain yields under a given scenario does not differ from the reference distribution related to „no change“ climate (see Fig. 8. in Dubrovský et al. 2000 for more details).

Oba výše uvedené generátory byly v rámci mnoha projektů (českých i mezinárodních) zaměřených na dopady změny klimatu používány ke konstrukci časových řad sloužících jako vstup pro růstové i jiné agrometeorologické modely zaměřené na zemědělské plodiny (Žalud a Dubrovský 2002; Trnka et al. 2004; Rotter et al. 2011; Thaler et al. 2012; Garofalo et al. 2019), vodní bilanci (Hlavinka et al. 2015; Hofmann et al. 2022), půdní klima (Trnka et al. 2013), agroklimatické podmínky (Trnka et al. 2011a) a škůdce (Kocmánková et al. 2010; 2011; Svobodová et al. 2013). V Trnka et al. (2011b) byl generátor použit ke konstrukci řad reprezentujících minulé klima. Výsledky získané v rámci projektů a uvedených publikací byly prezentovány i na mnoha konferencích lokálních i mezinárodních (včetně konferencí EGS, EGU, ECAC, EMS, AMS a AGU). Jako příklad získaných výsledků je na obr. 1 zobrazen přímý vliv CO_2 (skrže vyšší intenzitu fotosyntézy a zvýšenou efektivitu využití půdní vláhy) a nepřímý (skrže změnu klimatu způsobenou zvýšenou koncentrací CO_2 v atmosféře) vliv nárůstu CO_2 na dvojnásobek s využitím scénářů změny klimatu podle tří GCM modelů. Z obrázku je zřejmé, že přímý vliv je výrazně vyšší než vliv nepřímý (u dvou GCM je negativní, u třetího GCM je pozitivní). V rámci studia dopadů změn klimatu byl generátor použit i k citlivostní analýze, při které byl kvantifikován vliv změn jednotlivých parametrů generátoru (jimiž jsou v podstatě klimatické charakteristiky) na výnosy kukuřice (obr. 2; Dubrovský et al. 2000).

Jednostaniční generátor byl použit i k hydrologickému modelování pro malé povodí (Buchtele et al. 1999). Experimenty ukázaly, že variabilita a maxima modelových průtoků jsou při použití syntetických řad podhodnoceny. Významného zlepšení bylo následně dosaženo spážením denního generátoru s ge-



Obr. 3 Standardní odchylky maximálních hodnot denních průtoků v jednotlivých měsících (1–12), sezónách (W, SP, SU, AU = zima, jaro, léto, podzim) a celém roku (Y). Průtoky jsou simulované modelem SAC-SMA při použití 39letých pozorovaných meteorologických řad (CB = České Budějovice) a syntetických řad vytvořených generátorem Met&Roll ve třech nastaveních: WG-BAS = základní verze, WG-A3 = WG-BAS + roční chod korelací a Markovský řetězec 3. řádu, WG-A3M = WG-A3 řízený měsíčním generátorem (více viz Dubrovský et al. 2004).

Fig. 3. Standard deviations of monthly maxima of daily streamflows for individual months (1–12), seasons (W, SP, SU, AU), and a whole year (Y). The streamflows are simulated by the SAC-SMA model using 39-year observed weather series (CB = České Budějovice) and 39-year synthetic series generated with three settings of the generator: WG-BAS = basic version, WG-A3 = WG-BAS + annual cycle of correlations and 3rd order Markov chain, WG-A3M = WG-A3 is driven by the monthly generator (see Dubrovský et al. 2004 for more details).

nerátorem měsíčním (Dubrovský et al. 2004), což zlepšilo reprodukci nízkofrekvenční variability (viz obr. 3) i extrémních hodnot průtoků.

V roce 2006 byla vyvinuta metoda prostorové interpolace generátoru (Dubrovský et al. 2006). V rámci následných experimentů bylo ověřeno, že simulace výnosu pšenice ve 45 českých stanicích s použitím syntetických řad, vytvořených interpolovaným generátorem, je přesnější než interpolace modelových výnosů simulovaných růstovým modelem v nejbližších okolních stanicích s dostupnými meteorologickými pozorováními.

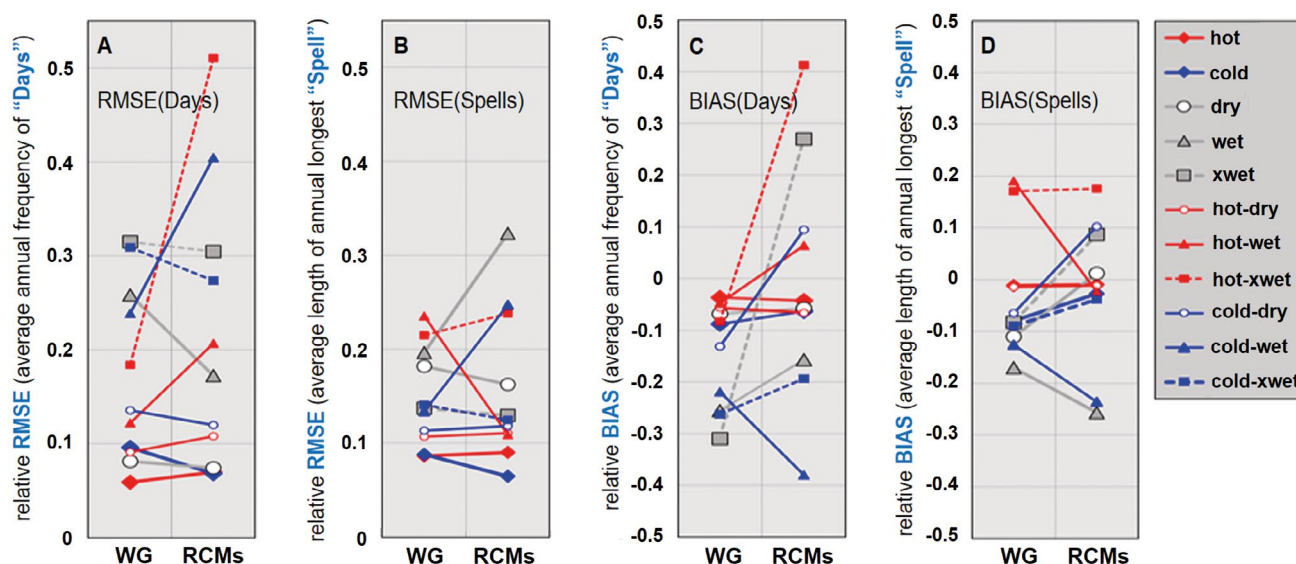
Od svého vzniku byl generátor průběžně validován prostřednictvím různých klimatických charakteristik a porovnáván s jinými zdroji časových řad, zejména statistickým downscalingem a GCM (Huth et al. 2001; 2003; Kyselý et al. 2001; Kyselý a Dubrovský 2005); RCM modely jsme začali používat až později. Experimenty popsané v těchto článcích se víceméně shodovaly v následujícím aspektu: jednalo-li se o testy, zda nově zavedený prvek modelu generátoru (např. implementace ročního chodu korelací a autokorelací mezi proměnnými či implementace měsíčního generátoru, kterým je denní generátor „řízen“, má vliv na kvalitu syntetických dat, pak výsledky sice ukázaly, že obecně došlo ke zlepšení reprodukce statistické struktury kalibračních dat, nicméně pro některé statistiky anebo v některých lokalitách mohlo dojít i ke zhoršení. Podobně neurčitý výsledek byl dosažen, když se porovnávaly výstupy získané generátorem s jinými metodami konstrukce časových řad (statistický downscaling či GCM). Z toho vyplynulo doporučení, aby před výběrem metody konstrukce časových řad byly provedeny testy prokazující vhodnost jednotlivých metod pro daný účel.

Kromě denních generátorů Met&Roll a M&Rfi byly vyvinuty ještě dva další jednostaniční generátory. Semiparametrický

hodinový generátor HOWGH používá generátor M&Rfi k syntéze denních řad, které jsou pak disagregovány na hodinové hodnoty pomocí resamplingu. V praxi byl použit pouze jednou (Hirschi et al. 2012). Neparametrický generátor GOMEZ je založen na resamplingu a společně s generátorem M&Rfi se zúčastnil velkého validačního projektu VALUE (COST Action ES1102; 2012–2015) zaměřeného na validaci a vzájemné porovnání různých metod statistického downscalingu (SD). V rámci finálního experimentu (Maraun et al. 2019; Gutiérrez et al. 2019) bylo prostřednictvím mnoha validačních indexů aplikovaných na časové řady teplot a srážek v souboru 86 stanic z databáze ECA&D porovnáno více než 60 metod typu MOS (Model Output Statistics) i PP (Perfect Prog) a 6 verzí jednostaničních denních generátorů (z toho 3 verze nastavení M&Rfi a dvě verze nastavení GOMEZ). Pokud jde o naše generátory, bylo zjištěno: (1) některé validační indexy (např. autokorelace denních teplotních minim a maxim, průměrné délky studených i horkých období, srážkové úhrny) jsou nejlépe reprezentované generátory M&Rfi a GOMEZ; u většiny z ostatních indexů generátory nebyly významně horší než pro daný index „vítězné“ metody. (2) Generátory výrazně podhodnocují meziroční variabilitu měsíčních průměrů. (3) V porovnání s ostatními SD metodami generátory všeobecně vykazují výrazně nižší mezistaniční variabilitu své schopnosti reprodukovat validační indexy. (4) GOMEZ dává lepší výsledky než M&Rfi.

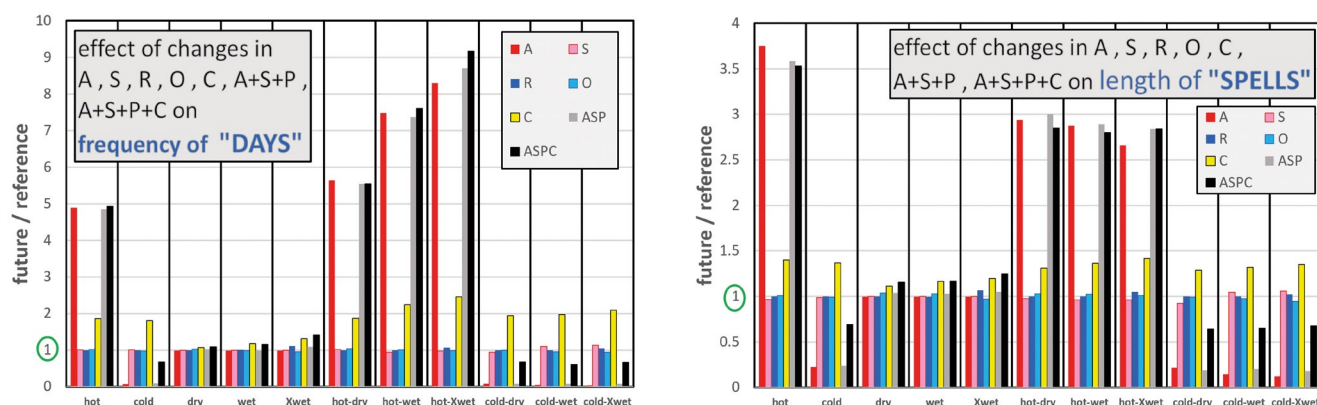
2.2 Prostorový generátor SPAGETTA

Posledním příspěvkem do rodiny generátorů vyvíjených v Česku je parametrický prostorový vícerozměrný generátor SPAGETTA (Dubrovský et al. 2020). Motivací pro jeho vývoj (který začal v roce 2016) byly 2 projekty se zcela rozdílným



Obr. 4 Validace generátoru SPAGETTA a sady 19 RCM modelů prostřednictvím četnosti výskytu „dnů“ (grafy A a C), které jsou významně prostorově horké/studené/suché/vlhké/extra vlhké/horké suché/horké vlhké/.../studené extra vlhké, a průměrné délky ročního nejdelšího souvislého „období“ takových dnů (grafy B a D). Grafy ukazují hodnoty relativního RMSE a BIASu spočtené z 8 hodnot odchylek (odpovídajících 8 evropským regionům definovaným v Dubrovský et al. 2020) průměrných ročních četností „dnů“ a průměrných ročních maximálních délek „období“, jež jsou odvozeny z generovaných a RCM-simulovaných řad od hodnot odvozených z E-OBS dat.

Fig. 4. Validation of the SPAGETTA generator and the ensemble of 19 RCMs in terms of the frequency of occurrence of “Days” (graphs A and C), which are spatially significantly hot/cold/dry/wet/extra wet/hot-dry/.../cold extra wet) and average length of the annual longest “Spells” of such Days (graphs B and D). The graphs show the relative RMSE (graphs A and B) and relative BIAS (C and D) based on the 8 deviation values (related to the eight target regions defined in Dubrovský et al. 2020) of the average “Days” and “Spells” indices derived from the synthetic (WG) and RCM-simulated series from the values derived from the E-OBS data.



Obr. 5 Průměry (z 19 RCM modelů) relativních změn (2070–2099 vs. 1971–2000) charakteristik (vlevo: četnost dnů, vpravo: max. délka období) 11 prostorových indexů definovaných pod obr. 4 a odvozených ze syntetických řad vytvořených pro oblast střední Evropy generátorem SPAGETTA pro 7 typů scénářů ZK, které předpokládají, že se změní jen vybrané klimatické charakteristiky: (A) průměrné teploty, (S) denní variabilita teplot, (R) průměrné množství srážek během dnů se srážkami, (O) četnost výskytu dnů se srážkami, (C) prostorové korelace a autokorelace (krok = 1 den) teplot i srážek, (ASP) všechny uvedené klimatické charakteristiky kromě změn prostorových korelací a autokorelací, (ASPC) všechny uvedené klimatické charakteristiky. Hodnota relativní změny = 1 indikuje žádnou změnu.

Fig. 5. Average (based on 19 RCMs) relative changes (2070–2099 vs. 1971–2000 ratio) in the means of the 11 “Days” and “Spells” indices introduced in Fig. 4. The indices were derived from synthetic weather series produced by the SPAGETTA generator for the Central Europe region for 7 types of CC scenarios which assume changes only in selected climatic characteristics: (A) average temperatures, (S) daily temperature variability, (R) mean precipitation sums on wet days, (O) frequency of wet days, (C) spatial correlations and lag-1-day correlations of temperature and precipitation, (ASP) all listed characteristics except for the correlations, (ASPC) all listed characteristics. The value of the relative change = 1 indicates no change.

zaměřením. V rámci jednoho projektu generátor simuloval syntetické jednorozměrné řady s ročním krokem a s uživatelem zadanou časoprostorovou strukturou a lineárním trendem. Tyto řady sloužily k výzkumu chování několika testů globální (kolektivní) statistické významnosti trendů (Huth a Dubrovský 2021). V rámci druhého projektu byl generátor vyvíjen pro použití v hydrologických modelech. Prostorový generátor SPAGETTA vznikl aplikací „spatialization“ metody vyvinuté Wilksem (1998, 2009) na již existující jednostaniční generátor M&Rfi. Wilksova metoda, která z jednostaničního generátoru Richardsonova typu udělá prostorový generátor, spočívá v použití dvou paralelních gaussovských streamů, které poskytují náhodně normálně rozdělené prostorově korelované hodnoty jednak pro Markovovy řetězce ke generování výskytu srážek v jednotlivých lokalitách a jednak pro autoregresní model ke generování nesrážkových proměnných. Takto vzniklý prostorový generátor byl validován prostřednictvím sady prostorových teplotních, srážkových i kombinovaných charakteristik. Ke konstrukci časových řad reprezentujících budoucí klima jsou parametry generátoru modifikovány scénáři ZK podle 19 RCM simulací z databáze CORDEX. Obr. 4 ukazuje, že i když generátor podhodnocuje (graf C) četnost prostorově významných „dnů“ (horkých, studených, suchých, vlhkých, extra-vlhkých a 6 teplotně-srážkových kombinací), hodnoty RMSE (grafy A a B) naznačují, že generátor je o něco úspěšnější, než je průměr z 19 RCM v simulaci četnosti těchto dnů i průměrné roční maximální délky období takových dnů. Obr. 5 demonstruje vliv změn (odvozených z RCM simulací) jednotlivých parametrů generátoru na změny zmíněných indexů. Dle očekávání největší vliv na budoucí změny bude mít nárůst průměrných teplot, druhým nejvýznamnějším faktorem má být nárůst časoprostorové korelace teplot a srážek.

3. Závěr

V článku byly představeny generátory vyvíjené v Česku od roku 1994 a prezentovány vybrané výsledky získané při jejich vývoji a používání. Tyto výsledky byly získány zejména generátory Met&Roll a M&Rfi v agroklimatických a hydrologických experimentech, nicméně stochastické generátory mohou být použity i v jakýchkoliv jiných aplikacích, pro které jsou zapotřebí meteorologické řady. V současné době se naše úsilí v oblasti vývoje generátorů soustředí na prostorový generátor SPAGETTA, tak aby byl schopen vytvářet co nejvěrohodnější syntetické řady reprezentující současné (v souladu s meteorologickými pozorováními) i budoucí (v souladu s RCM a GCM simulacemi) klima a sloužící jako vstup pro (nejen) agroklimatické a hydrologické modely. Nejbližšími cíli jsou zejména: (a) interpolace generátoru (aby byl schopen generovat řady i pro sadu stanic či uzlových bodů, pro které nejsou k dispozici meteorologická data nutná ke kalibraci generátoru) a (b) implementace nízkofrekvenční variability do modelu generátoru (aby lépe reprodukoval proměnlivost klimatu v delším, např. měsíčním, kroku).

Závěrem dvě poznámky: (1) zatímco generátory v rámci experimentů zaměřených na dopady ZK „sloužily“ simulačním modelům (ať už zemědělským či hydrologickým) jako nástroj pro konstrukci meteorologických vstupů, současně i tyto simulační modely sloužily generátorům k jejich tzv. „nepřímé validaci“, ve které byly porovnávány výstupy těchto modelů získané při použití syntetických řad s výstupy získanými při použití pozorovaných řad. Tyto experimenty v mnoha případech ukázaly, že i když generátor neumí dokonale reprodukovat statistické charakteristiky reálných meteorologických řad, nemusí to mít zásadní vliv na statistiky (např. průměr a variabilitu) výstupů modelů „nakrmených“ syntetickými meteorologickými řadami. (2) V souvislosti s předchozí poznámkou platí, že všechny zde zmíněné generátory jsou k dispozici pro jakékoliv jiné smy-

slupné experimenty, jelikož každá nová aplikace generátorů vytváří možnost pro jejich zdokonalování.

Poděkování:

Vývoj generátorů a jejich aplikace probíhaly v rámci mnoha projektů hrazených ze zdrojů tuzemských [GAČR (zejména 18-15958S), GAAV, MŠMT (LD12029, 2012–2015; 7AM-B16AT020, 2016–2017)] i mezinárodních [projekty ADAGIO, AGRIDEMA, CLIMSAVE, CECILIE, COST (projekt ES 1102 „VALUE“; 2012–2015)]. V posledním desetiletí se generátory M&Rfi a SPAGETTA zúčastnily zejména projektů Intersucho, CzechAdapt a SustES a aktuálně projektů PERUN (projekt TAČR, SS0203004000), GAČR (21-07954S) a AdAgriF.

Literatura:

- BRÁZDIL, R., ROŽNOVSKÝ, J., 1996. Impacts of a potential climate change on agriculture of the Czech Republic: country study of climate change for the Czech Republic. *Národní klimatický program České republiky*, sv. 21. Praha: ČHMÚ. ISBN 80-85813-31-9.
- BUCHTELE, J., BUCHTELOVÁ, M., FOŘTOVÁ, M., DUBROVSKÝ, M., 1999. Runoff changes in Czech River basins – the outputs of rain-fall-runoff simulations using different climate change scenarios. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Vol. 47, s. 180–194.
- DUBROVSKÝ, M., 1996a. Met&Roll: the stochastic generator of daily weather series for the crop growth model. *Meteorological Bulletin*, Vol. 49, s. 97–105.
- DUBROVSKÝ, M., 1996b. Validation of the stochastic weather generator Met&Roll. *Meteorological Bulletin*, Vol. 49, s. 129–138.
- DUBROVSKÝ, M., 1997. Creating Daily Weather Series with Use of the Weather Generator. *Environmetrics*, Vol. 8, s. 409–424. Dostupné z: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199709/10\)8:5%3C409::AID-ENV261%3E3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199709/10)8:5%3C409::AID-ENV261%3E3.0.CO;2-0).
- DUBROVSKÝ, M., ŽALUD, Z., ŠTASTNÁ M., 2000. Sensitivity of CERES-Maize yields to statistical structure of daily weather series. *Climatic Change*, Vol. 46, s. 447–472. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1005681809065>.
- DUBROVSKÝ, M., BUCHTELE, J., ŽALUD, Z., 2004. High-Frequency and Low-Frequency Variability in Stochastic Daily Weather Generator and Its Effect on Agricultural and Hydrologic Modelling. *Climatic Change*, Vol. 63, s. 145–179. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000018504.99914.60>.
- DUBROVSKÝ, M., NEMEŠOVÁ, I., KALVOVÁ, J., 2005. Uncertainties in climate change scenarios for the Czech Republic. *Climate Research*, Vol. 29, s. 139–156. Dostupné z: <https://doi.org/10.3354/cr029139>.
- DUBROVSKÝ, M., METELKA, L., SEMERÁDOVÁ, D., TRNKA, D., HALÁSOVÁ, O. et al., 2006. The CaliM&Ro Project: Calibration of Met&Roll Weather Generator for sites without or with incomplete meteorological observations. In: O. E. Tveito, M. Pasqui (eds.): *Proceedings from the 5th annual meeting of the European Meteorological Society: Session AW8 – Weather Types Classifications*. 12–16 September 2005, s. 98–107.
- DUBROVSKÝ, M., HUTH, R., DABHI, H., ROTACH, M. W., 2020. Parametric gridded weather generator for use in present and future climates: focus on spatial temperature characteristics. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 139, s. 1031–1044. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03027-z>.
- GAROFALO, P., VENTRELLA, D., KERSEBAUM, K. C., GOBIN, A., TRNKA, M. et al., 2019. Water footprint of winter wheat under climate change: Trends and uncertainties associated to the ensemble of crop models. *Science of The Total Environment*, Vol. 658, s. 1186–1208. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.279>.
- GUTIÉRREZ, J. M., MARAUN, D., WIDMANN, M., HUTH, R., HERTIG, E. et al., 2019. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*, Vol. 39, s. 3750–3785. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.5462>.
- HIRSCHI, M., STOECKLI, S., DUBROVSKÝ, M., SPIRIG, C., CALANCA, P. et al., 2012. Downscaling climate change scenarios for apple pest and disease modeling in Switzerland. *Earth System Dynamics*, Vol. 3, s. 33–47. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/esd-3-33-2012>.
- HLAVINKA, P., KERSEBAUM, K. C., DUBROVSKÝ, M., FISCHER, M., POHANKOVÁ, E. et al., 2015. Water balance drought stress and yields for rainfed field crop rotations under present and future conditions in the Czech Republic. *Climate Research*, Vol. 65, s. 175–192. Dostupné z: <https://doi.org/10.3354/cr01339>.
- HOFMANN, M., VOLOSCIUK, D., DUBROVSKÝ, M., MARAUN, D., SCHULTZ, H. R., 2022. Downscaling of climate change scenarios for a high-resolution, site-specific assessment of drought stress risk for two viticultural regions with heterogeneous landscapes. *Earth System Dynamics*, Vol. 13, s. 911–934. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/esd-13-911-2022>.
- HUTH, R., KYSELÝ, J., DUBROVSKÝ, M., 2001. Time structure of observed, GCM-simulated, downscaled, and stochastically generated daily temperature series. *Journal of Climate*, Vol. 14, s. 4047–4061. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3C4047:TSSOGS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C4047:TSSOGS%3E2.0.CO;2).
- HUTH, R., KYSELÝ, J., DUBROVSKÝ, M., 2003. Simulation of surface air temperature by GCMs, statistical downscaling and weather generator: higher-order statistical moments. *Studia Geophysica et Geodaetica*, Vol. 47, s. 203–216. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1022216025554>.
- HUTH, R., DUBROVSKÝ, M., 2021. Testing for Trends on a Regional Scale: Beyond Local Significance. *Journal of Climate*, Vol. 34, s. 5349–5365. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0960.1>.
- KALVOVÁ, J., 1996. Climate change scenarios for the Czech Republic: country study of climate change for the Czech Republic. *Národní klimatický program České republiky*, sv. 24. Praha: ČHMÚ. ISBN 80-85813-37-8.
- KOCMÁNKOVÁ, E., TRNKA, M., EITZINGER, J., FORMAYER, H., DUBROVSKÝ, M. et al., 2010. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests in the Central European region. *Climate Research*, Vol. 44, s. 95–105. Dostupné z: <https://doi.org/10.3354/cr00905>.
- KOCMÁNKOVÁ, E., TRNKA, M., EITZINGER, J., DUBROVSKÝ, M., ŠTEPÁNEK, P. et al., 2011. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at a high spatial resolution: a novel approach. *The Journal of Agricultural Science*, Vol. 149, Issue 2, s. 185–195. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0021859610001140>.
- KYSELÝ, J., HUTH, R., DUBROVSKÝ, M., 2001. Simulace extrémních teplotních jevů globálními cirkulačními modely, statistickým downscalingem a stochastickým generátorem. *Meteorologické zprávy*, roč. 54, č. 3, s. 73–82. ISSN 0026-1173.
- KYSELÝ, J., DUBROVSKÝ, M., 2005. Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator: effects of interdiurnal and interannual variability reproduction. *International Journal of Climatology*, Vol. 25, s. 251–269. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.1120>.
- MARAUN, D., HUTH, R., GUTIÉRREZ, J. M., SAN MARTIN, D., DUBROVSKÝ, M. et al. 2019. The VALUE perfect predictor experiment: evaluation of temporal variability. *International Journal of Climatology*, Vol. 39, s. 3786–3818. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.5222>.
- RICHARDSON, C. W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research*

- arch, Vol. **17**, s. 182–190. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR017i001p00182>.
- RÖTTER, R. P., PALOSUO, T., PIRTIOJA, N. K., DUBROVSKÝ, M., SALO, T. et al., 2011. What would happen to barley production in Finland if global warming exceeded 4 °C? A model-based assessment. *European Journal of Agronomy*, Vol. **35**, s. 205–214. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.06.003>.
- SVOBODOVÁ, E., TRNKA, M., ŽALUD, Z., SEMERÁDOVÁ, D., DUBROVSKÝ, M. et al., 2013. Climate variability and potential distribution of selected pest species in south Moravia and north-east Austria in the past 200 years – lessons for the future. *The Journal of Agricultural Science*, Vol. **152**, s. 225–237. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0021859613000099>.
- THALER, S., EITZINGER, J., TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., 2012. Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science*, Vol. **150**, s. 537–555. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0021859612000093>.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., ŽALUD, Z., 2004. Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in Spring Barley Production in the Czech Republic. *Climatic Change*, Vol. **64**, s. 227–255. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/B:C-LIM.0000024675.39030.96>.
- TRNKA, M., OLESEN, J. E., KERSEBAUM, K. C., SKJELVA, A. O. et al., 2011a. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, Vol. **17**, s. 2298–2318. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x>.
- TRNKA, M., BRÁZDIL, R., DUBROVSKÝ, M., SEMERÁDOVÁ, D., ŠTĚPÁNEK, P. et al., 2011b. A 200-year climate record in Central Europe: implications for agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. **31**, s. 631–641. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0038-9>.
- TRNKA, M., KERSEBAUM, K. C., EITZINGER, J., HAYES, M., HLAVINKA, P. et al., 2013. Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. *Climatic Change*, Vol. **120**, s. 405–418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0786-4>.
- WILKS, D. S., 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change*, Vol. **22**, s. 67–84. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00143344>.
- WILKS, D. S., 1998. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*, Vol. **210**, s. 178–191. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00186-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00186-3).
- WILKS, D. S., 2009. A gridded multisite weather generator and synchronization to observed weather data. *Water Resources Research*, Vol. **45**, s. 1–11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2009WR007902>.
- ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M., 2002. Modelling climate change impacts on maize growth and development in the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. **72**, s. 85–102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s007040200015>.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Ladislav Metelka, Ph.D., Bc. Idris Patrik Beshir