

Stochastické modelování meteorologických časových řad: využití pro studium dopadů klimatických změn na zemědělství

Martin Dubrovský

Ústav fyziky atmosféry, AVČR
Husova 456, 50008 Hradec Králové

1 Úvod

V důsledku očekávaných změn klimatu se stále větší pozornost věnuje studiu možných dopadů na různá odvětví lidské činnosti a hledání strategií k redukci klimatických změn (KZ), případně zmírnění jejich negativních dopadů [u nás např. Moldan *et al* (1993)].

Předmětem tohoto článku je koncepce studia impaktů KZ na rostlinnou výrobu opírající se o růstový simulační model a stochastický generátor počasí. Příspěvek byl motivován účastí v projektu 'Country study' (CS), zaměřeném, mimo jiné, na odhad potenciálních dopadů KZ na tvorbu a vývoj druhové skladby plodin a na velikost výnosů. V první části příspěvku (§2) jsou vysvětleny jednotlivé prvky koncepce, v §3 je popsán model stochastického generátoru implementovaného v programu Met&Roll, který byl pro projekt CS vyvinut. V závěru jsou navrženy možné modifikace stochastického generátoru, které by mohli vést k větší věrohodnosti syntetických řad.

2 Koncepce studia dopadů klimatických změn na rostlinnou výrobu

Jedna z možných koncepcí studia dopadů KZ na zemědělství (Obr.1) se opírá o využití růstového simulačního modelu (RSM), který simuluje vývoj plodiny den po dni. Jelikož RSM vyžaduje denní klimatické charakteristiky (teplotní extrémy *TMIN* a *TMAX*, sumu globálního záření *SRAD* a úhrn srážek *RAIN*), vyvstává otázka, jak tato data zajistit pro změněné klima, pro něž máme k dispozici pouze měsíční charakteristiky. Řešením může být modifikace pozorované časové řady, kdy denní hodnoty jednotlivých veličin jsou transformovány tak, aby se definovaným způsobem změnil průměr a/nebo rozptyl hodnot veličiny pro jednotlivé dny či měsíce v roce (např. Mearns *et al.*, 1992, Bacsí and Hunkár, 1994). Výhodou tohoto přístupu je jednak jednoduchost, jednak zachování stochastické struktury časových řad. Nevýhodou je, že délka syntetické řady je limitována délkou pozorované řady.

Alternativním řešením je využití stochastického modelu, který generuje syntetická data na základě předchozí analýzy dostatečně dlouhé historické řady. Postup vyhodnocení impaktů pak zahrnuje následující kroky (Obr.1):

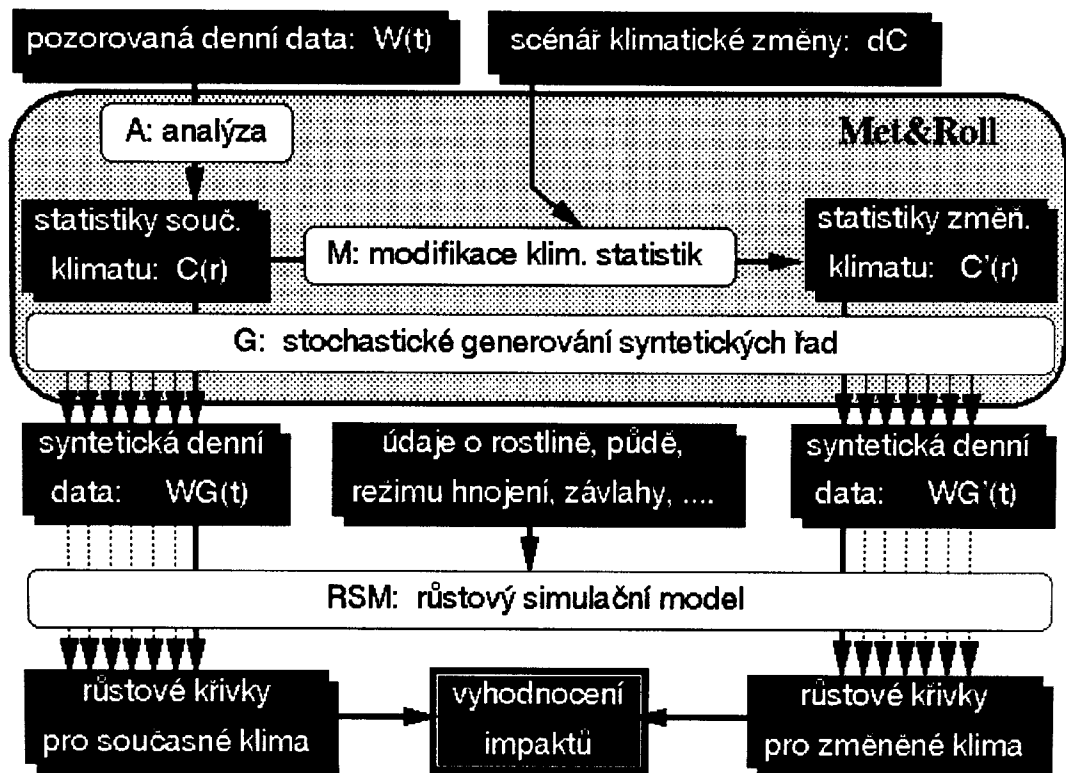
(1) 'A': Analýza pozorovaných řad. V tomto kroku musí být z historických dat odhadnuty klimatické statistiky (parametry stochastického generátoru), z nichž pak model generuje syntetické řady. Sbor klimatických statistik zahrnuje jednak charakteristiky ročního chodu veličin, s nimiž model pracuje, jednak charakteristiky vazeb mezi veličinami, jednak charakteristiky interdiurní proměnlivosti. Přesný výčet statistik závisí na použitém

generátoru a bude upřesněn dále (§3).

(2) 'G': Stochastický generátor syntetických řad. Požadavkem je, aby se syntetické řady statisticky podobaly původním řadám, což lze chápat tak, že klimatické statistiky získané analýzou syntetické řady (procedura 'A') jsou statisticky nevýznamně odlišné od klimatických statistik odvozených z pozorovaných řad. Generátory jsou obvykle založeny na autoregresních a Markovovských modelech (podrobněji viz §3).

(3) 'M': Klimatické charakteristiky jsou modifikovány s ohledem na regionální scénáře klimatických změn. Vzhledem k tomu, že výstupy z všeobecných cirkulačních modelů (GCM) explicitně nevypovídají o změnách klimatických charakteristik použitých jako parametrů generátoru, je třeba zavést určité zjednodušující předpoklady (Wilks, 1992), či testovat různé kombinace změn parametrů vyhovujících scénářům klimatických změn.

(4) 'RSM': růstový simulační model (např. CERES; viz. Mearns *et al.*, 1992; Hunkár, 1994; Bacsí and Hunkár, 1994). vstup: řady denních meteorologických charakteristik (*SRAD*, *TMIN*, *TMAX*, *RAIN*), charakteristiky půdy (fyzikální a chemické složení, vodní obsah, ...) a plodiny, agrotechnologická data (datum, hloubka a hustota setby, průběh zavlažování a hnojení, ...); výstup: data dosažení jednotlivých fenologických fází, výnosy, růstové křivky.



Obr.1. Koncepce studia impaktů klimatických změn na rostlinnou výrobu [převzato z Wilks (1992) a upraveno]. A: analýza řad denních pozorování; M: modifikace klimatických statistik v souladu se scénářem klimatických změn; G: generování syntetické řady, RSM: růstový simulační model. Vstupní informace jsou: pozorovaná denní data, $W(t)$, scénář klimatické změny, dC , údaje o rostlině, půdě, režimu zavlažování a hnojení a další agronomické informace. V orámované oblasti jsou služby poskytovány programem Met&Roll (viz. §3).

Jelikož řada je generována náhodně (viz. §3.1) je k dosažení potřebného efektu žádoucí, aby s konkrétními vstupními podmínkami byl experiment (G + RSM) proveden opakovaně. Statistickou analýzou výstupů z RSM pak získáme odhad citlivosti zemědělské produkce na změny klimatických charakteristik.

3 Met&Roll

Procedury 'A', 'G' a 'M' na Obr.1 jsou dostupné v programu Met&Roll, který byl vyvinut pro projekt 'Country Study'.

3.1 model generátoru

Model generátoru vychází z modelu popsaném v Wilks (1992). Model pracuje se čtyřmi proměnnými: denní suma globální sluneční radiace (*SRAD*), denní maximum teploty (*TMAX*), denní minimum teploty (*TMIN*) a denní úhrn srážek (*RAIN*). Výskyt srážek je modelován Markovovým řetězcem 1.řádu, $M(1)$, denní úhrn srážek je modelován Gamma rozdělením, $\Gamma(\alpha, \beta)$. Zbývající veličiny jsou modelovány autoregresním modelem 1.řádu, $AR(1)$:

$$\mathbf{x}^*(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}^*(t-1) + \mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (\text{eq.1})$$

kde \mathbf{A} a \mathbf{B} jsou matice $[3 \times 3]$, t je pořadí dne, $\boldsymbol{\varepsilon}$ je vektor dimenze 3 vzájemně nezávislých veličin s normálním rozdělením (bílý šum) a $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ je vektor standardizovaných hodnot veličin *SRAD*, *TMAX* a *TMIN*:

$$x_i^*(t) = [x_i(t) - \mu_{ij}(d)] / \sigma_{ij}(d) \quad (\text{eq.2})$$

kde x_p , $i = 1, 2, 3$ značí po řadě *SRAD*, *TMAX* a *TMIN*, $\mu_{ij}(d)$ a $\sigma_{ij}(d)$ jsou střední hodnota a směrodatná odchylka veličiny x_i pro daný den v roce pro den beze srážek ($j=0$) a se srážkami $j=1$).

V průběhu analýzy (procedura 'A') jsou nejdříve určeny zhlazené roční chody $\hat{\mu}_{ij}$ a $\hat{\sigma}_{ij}$ (metodou robustní lokálně vážené regrese [RLVR; Solow, 1988; Dubrovský, 1993]), poté jsou hodnoty *SRAD*, *TMAX* a *TMIN* standardizovány (v závislosti na výskytu srážek) a vypočteny matice \mathbf{A} a \mathbf{B} z kovariančních matic $\text{cov}(\mathbf{x}_i^*(t), \mathbf{x}_j^*(t))$ a $\text{cov}(\mathbf{x}_i^*(t), \mathbf{x}_j^*(t-1))$. Parametry gama rozdělení jsou odhadnuty metodou maximální věrohodnosti (Suzuki, 1980). Všechny uvedené charakteristiky stochastického modelu (přehled viz. Tab.I) jsou uloženy na disk a mohou být dále použity ke generování libovolně dlouhé syntetické řady.

Tab.I. Parametry stochastického generátoru.

charakteristika	uložení na disk
▶ přechodové pravděpodobnosti modelu $M(1)$	- pro každý den v roce
▶ parametry gama rozdělení, α a β	- pro jednotlivé měsíce
▶ zhlazené hodnoty $\hat{\mu}_{ij}$ a $\hat{\sigma}_{ij}$ pro $[i, j] \in \{1, 2, 3\} \times \{0, 1\}$	- pro každý den v roce
▶ matice \mathbf{A} a \mathbf{B}	- jedna verze matic platná pro celý rok

V proceduře 'G' je generována syntetická řada $\{[SRAD, TMAX, TMIN, RAIN]; i = 1, \dots, n\}$ podle algoritmu:

- (1) generování výskytu srážek modelem $M(1)$ (závisí pouze na výskytu srážek v předešlém dni)
- (1b) v případě, že je den se srážkami, je generováno množství srážek podle rozdělení $\Gamma(\alpha(m), \beta(m))$, kde m je index měsíce ($m = 1, \dots, 12$).
- (2) generování vektoru ϵ a výpočet standardizovaných hodnot veličin $SRAD$, $TMAX$ a $TMIN$ podle (eq.1).
- (3) destandardizace veličin $SRAD$, $TMAX$ a $TMIN$ podle (eq.2)

3.2 Modifikace klimatických charakteristik

Met&Roll nabízí následující možnosti modifikace klimatických charakteristik:

- (1) modifikace podle harmonické funkce
- (2) modifikace podle tabulky denních přírůstků
- (3) modifikace podle měsíčních přírůstků

Před dalším použitím je modifikované roční chody možné (v případě použití metody (3) potřebné) zhladit metodou RLVR. Čtvrtou možností je přímá modifikace pozorované řady denních hodnot (např. Mearns *et al.*, 1992, Bacsí and Hunkár, 1994).

Uživatel může měnit nezávisle na sobě roční chod každé z 16 charakteristik ('suchý'/'vlhký' průměr/sm.odchylku pro $SRAD$, $TMAX$, $TMIN$ ($\rightarrow 2 \times 2 \times 3$ charakteristik); 2 parametry gama rozdělení a 2 přechodové pravděpodobnosti modelu $M(1)$), a zároveň definovat, zda modifikace bude aditivní či multiplikativní. Vzhledem k tvaru dostupných výstupů z modelů GCM je nejpravděpodobnější využití metody (3), přičemž pro teplotní charakteristiky se předpokládají aditivní změny a pro radiaci a srážky změny multiplikativní.

4 Závěr

Ačkoliv testy potvrdily, že všechny vstupní klimatické charakteristiky (Tab.I) jsou modelovány s dostatečnou přesností, nabízí se otázka, zda i jiné klimatické charakteristiky odvozené ze syntetických řad (např. variabilita sezónních či ročních průměrů) jsou v souladu s pozorováním. Příslušné testy ještě nebyly provedeny, nicméně lze očekávat, že výše popsany jednoduchý model nebude plně vyhovovat. Do budoucna lze uvažovat o následujících změnách modelu generátoru:

- ▶ autoregresní model: vyšší řád
- ▶ výskyt srážek: vícestavový Markovovský model vyššího řádu (podle Gregory *et al.* (1993) lze tak mnohem lépe modelovat sezónní variabilitu)
- ▶ množství srážek: jiné rozdělení než gama rozdělení (exponenciální rozdělení; zobecněné lognormální rozdělení)
- ▶ závislost srážkového modelu na teplotách [Young, 1994] (v současném modelu jsou srážky modelovány zcela nezávisle, generovaná hodnota zbývajících veličin je závislá na tom zda je den suchý či vlhký).

- ▶ uvažovat závislost matic autoregresního modelu na ročním období

Kromě uvedených změn, které předpokládají práci pouze s modelovými proměnnými pro určité místo (single-point process) se nabízí poněkud odlišný postup spočívající v generování hodnot meteorologických proměnných podmíněným chodem cirkulačních typů [Wilson and Lettenmaier (1992), Bogardi *et al.* (1993)]. Uvedené práce navíc dávají návod, jak generovat srážková data pro několik stanic současně.

Kromě úprav samotného modelu je třeba další pozornost věnovat procesu modifikace parametrů generátoru v souladu se scénáři klimatických změn. V současné době jsou k dispozici pouze modelově simulované změny průměrných měsíčních teplot, radiačních a srážkových úhrnů. Zůstává ovšem nezodpovězena celá řada otázek:

- ▶ Jak se změní variabilita?
- ▶ Změní se stejně minimální i maximální teploty?
- ▶ Budou změny stejné pro 'suché' i 'vlhké' dny?
- ▶ U srážek je k dispozici jen změna měsíčních srážkových úhrnů. Ale: Jak se na této změně podílí změna počtu dní se srážkami a jak parametry distribuční funkce denních úhrnů?
- ▶ Jak se změní přechodové pravděpodobnosti Markovovského modelu, matice autoregresního modelu?

Jelikož existuje nepřehledné množství možností modifikace parametrů, je třeba tyto možnosti vhodným způsobem kombinovat a zahrnout do analýzy citlivosti.

Závěrem je snad ještě potřeba upozornit, že - vzhledem k 'přesnosti' předpovědi klimatických změn na regionální úrovni - je třeba uvedenou koncepci chápat nikoliv jako prostředek k prognóze rostlinné produkce ale jako prostředek ke studiu citlivosti systému na změny klimatických statistik.

5 Literatura

- BACSI Zs., HUNKÁR M., 1994: Assessment of the impacts of climate change on the yields of winter wheat and maize, using crop models. *Időjárás*, **98**, #2, 119-134
- BOGARDI I., MATYASOVSKY I., BARDOSSY A., DUCKSTEIN L., 1993: Application of a space-time stochastic model for daily precipitation using atmospheric circulation patterns. *J.Geoph.Res.*, **98**, #D9, 16653-16667.
- DUBROVSKÝ M.: Robust locally weighted regression: algorithm, programming and application to radiation data. Seminární práce PGDS, MFF UK Praha, 1993, 22 s.
- GREGORY J.M., WIGLEY T.M.L., JONES P.D., 1993: Application of Markov models to area-average daily precipitation series and interannual variability in seasonal totals. *Climate dynamics*, **8**, 299-310
- HUNKÁR M., 1994: Validation of crop simulation model CERES-Maize. *Időjárás*, **98**, 37-46.
- MEARNS L.O., ROSENZWEIG C., GOLDBERG R., 1992: Effect of changes in interannual climatic variability on CERES-Wheat yields: sensitivity and 2xCO₂ general circulation model studies. *Agricultural and forest meteorology*, **62**, p.159-189.
- MOLDAN B. a kol., 1993: Rizika změny klimatu a strategie jejich snížení. Národní klimatický program ČR, ČHMÚ Praha, 174pp.

- SOLOW A.R.: Detecting changes through time in the variance of a long-term hemispheric temperature record: an application of robust locally weighted regression. *J.Climate*, **1**, 1988, s. 290-296.
- SUZUKI E., 1980: A summarized review of theoretical distributions fitted to climatic factors and Markov chain models of weather sequences with some examples. In: *Statistical climatology (Developments in Atmospheric Science, 13)*, Elsevier scientific publishing company., Amsterdam—Oxford—New York, p.1-20.
- YOUNG K. C., 1994: A Multivariate Chain Model for Simulating Climatic Parameters from Daily Data. *J.Appl.Meteorol.*, **33**, 661-671.
- WILKS D.S., 1992: Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change* **22**, 67-84.
- WILSON L.L., LETTENMAIER D.P., 1992: A hierarchical stochastic model of large-scale atmospheric circulation patterns and multiple station daily precipitation. *J.Geoph.Res.*, **97**, #D3, 2791-2809

Summary

Martin Dubrovský: *Stochastic modelling of meteorological time series: application to climate change impact studies in agriculture.*

The contribution deals with the method of estimating potential impacts of climatic changes on crop yields. The method (Fig.1) employs crop growth model (CGM) which uses daily weather conditions, soil conditions, plant characteristics and agrotechnology data to simulate daily incrementing of crop growth, development and yield. The daily weather data (solar radiation, maximum and minimum air temperature and rainfall data) may be obtained by modification of the baseline weather data by factors following from the climate change scenarios. Alternatively, the stochastic weather generator (SWG) may be employed to generate weather series of desired length. The parameters of the SWG (Tab.I) are estimated from the observed weather series and modified in accordance with the climate change scenarios. The estimate of the climate change impacts results from the comparison of the crop model runs using baseline weather data and modified/generated weather data series.

The SWG which is described in §3 follows Wilks (1992). The generator employs first-order Markov chain model to generate precipitation occurrence, Gamma distribution to generate precipitation amount and first-order autoregressive model to generate remaining quantities (*SRAD*, *TMAX*, *TMIN*). The PC program 'Met&Roll' was developed to analyse and generate daily weather series. Met&Roll also enables to modify parameters of the generator in accordance with climate change scenarios.

The future improvements of the stochastic weather generator are suggested in the conclusion.