

COMPUTING OF GLOBAL RADIATION OF METEOROLOGICAL VARIABLES

VÝPOČET GLOBÁLNÍ RADIACE Z METEOROLOGICKÝCH PRVKŮ

Kapler P., Trnka M., Žalud Z.

Ústav krajinné ekologie, Agronomická fakulta, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika.

E-mail: pavel.kapler@centrum.cz

ABSTRACT

Sufficiently precise and extensive database of measured daily values of global radiation is still a limiting factor for some agrometeorological (Crop Growth Models) and hydrological studies. While high quality data from standardised weather stations on temperature, humidity and precipitation are readily available for most sites of the world, the density of the direct global radiation measurements still remains insufficient. Therefore seven methods for estimating daily global radiation have been tested on ten sites in the Czech Republic and Austria. The total number of years for which all necessary data were available was 114 i.e. 41 640 observational days. Coefficient of determination, average root mean square error (RMSE) and mean bias error (MBE) values indicated that the highest precision is reached when sunshine duration is used as predictor. For Ångström's method RMSE value (year) equalled $1.6 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ and MBE $0.3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$. Generally the Ångström's method is superior to all tested methods. If there are no reliable sunshine duration data, Supit's formula yields sufficiently precise outputs if good quality data of nebulosity and daily maximum and minimum air temperature are provided. If nebulosity is not available Winslow's method works with daily sum of precipitation and air temperature should be used. In case that the precipitation is not measured and the sunshine duration data are not available or are imperfect, the Donatelli-Campbell's method requiring daily values of minimum and maximum temperature and precipitation might be recommended.

Klíčová slova: globální radiace, metody výpočtu, teplota, oblačnost, úhrn srážek

ÚVOD

Měření hodnot globálního záření vyžaduje použití přesných a nákladných přístrojů jako jsou např. pyranometry či aktinometry; avšak většina meteorologických stanic jak ve střední Evropě, tak po celém světě, dosud není těmito přístroji vybavena. Většina meteorologických stanic však registruje jiné meteorologické prvky: srážky, oblačnost, teplotu vzduchu či dobu slunečního svitu. Na lokalitách, kde sluneční záření není měřeno, případně pro období, z něhož požadovaný vstup chybí, je možno potřebu stanovení globální radiace vyřešit náhradním výpočtem. Rozeznáváme

dva různé přístupy získávání těchto hodnot: A) užití stochastických generátorů (např. Richardson, 1981 a Dubrovský, 1997) a B) rovnice využívající empirických vztahů (např. Ångström, 1924). Stochasticky generovaná data mohou být užitečná ke zkoumání teoreticky simulovaných situací, k nimž může z dlouhodobého hlediska dojít; avšak takto generovaná data nenahradí skutečně naměřené hodnoty, právě tak jako tento přístup nevede k získání srovnatelných dat, jež by vystihla reálnou meteorologickou situaci v určitém čase na určitém místě.

Rovnice založené na empirických vztazích mohou poskytnout hodnoty globální radiace vypočítané z jiných, obvykle měřených a tedy dostupných meteorologických prvků. Množství existujících metod je značné, v této práci bylo srovnáno sedm nejpoužívanějších.

Empirické rovnice často vyžadují hodnotu *celkového denního extraterestrického záření* (Q_a), přičemž platí, že záření dopadající na povrch Země (Q) je částí Q_a . Tento jev je způsoben oslabením přichozího záření při průchodu atmosférou. Interakce mezi zářením a složkami atmosféry jsou složité, ale vztahy mezi propustností atmosféry (atmosférickou transmitancí) a některými dalšími meteorologickými prvky je možno empiricky popsat. Parametry užívané zde srovnávanými rovnicemi jako vstupy jsou - kromě jiných - **relativní trvání slunečního svitu** (tj. astronomicky možného slunečního svitu přepočteného pro ideální horizont; metoda Ångströмова, 1924, upravil Prescott, 1940 a Martínez-Lozano *et al.*, 1984), **teplota** (Hargreaves *et al.*, 1985; Donatelli a Campbell, 1998), **teplota v kombinaci s oblačností** (Supit a Van Kappel, 1998) a **teplota v kombinaci s denním úhrnem srážek** (Thornton a Running, 1999; Winslow *et al.*, 2001).

Z pohledu výzkumu Ústavu krajinné ekologie jsou hodnoty denního globálního záření slunce nezbytné jako základní energetické vstupy pro např. většinu tzv. růstových modelů (tj. modelů simulujících růst a vývoj plodin), neboť růst je v první řadě závislý na fotosyntetických procesech, které zahrnují utilizaci záření a jeho konverzi na energii chemických vazeb. Globální radiace je také nepostradatelným vstupem pro většinu studií např. potenciální evapotranspirace, které jsou součástí nejen modelů růstových, ale také hydrologických.

Cílem práce bylo vypočítat, srovnat přesnost a vyhodnotit použitelnost několika modelů pro stanovení denních hodnot solární radiace (Q) nad střední Evropou (zahrnuty stanice z ČR a Rakouska) za různých předpokladů: pro případy, kdy jsou k dispozici hodnoty doby slunečního svitu, hodnoty teploty a oblačnosti, teploty a úhrnů srážek, nebo pouze teploty. Závěr příspěvku vede k doporučení aplikace nejvhodnější metody (metod) pro výpočet chybějících řad denních sum globální radiace pro výše uvedené účely.

METODIKA

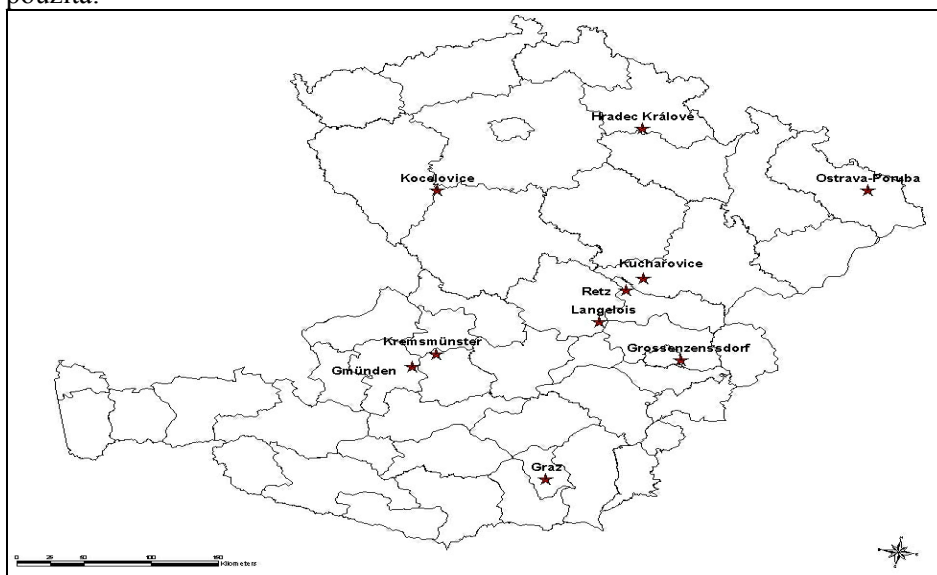
Měřená meteorologická data použitá jako vstupy pro jednotlivé metody pochází z 10 stanic (4 v ČR a 6 v Rakousku), které byly vybrány jako nejspolehlivější ze šestnácti původně uvažovaných. Základním požadavkem na tyto stanice bylo měření skutečné doby slunečního svitu. Stanice pak

byly vybírány též na základě svých geografických (obr. 1) a topografických (tab. 1) poloh a také podle počtu let nepřetržitého měření. Protože převážná většina zemědělské produkce ve střední Evropě je situována do nadmořských výšek menších než 600 m, vybrané stanice splňují tento rozsah. K výpočtům a srovnání byla použita jen data nezatížená chybami vzniklými při měření, a to z let, kdy byly měřeny všechny potřebné parametry. Celkově bylo propočítáno 114 kompletních pozorovacích let (tj. 41640 pozorovacích dnů), s výjimkou metody Supitovy, pro niž se kalkulovalo pouze 97 let (tj. 35427 pozorovacích dní).

Tab. 1: Přehled meteorologických stanic (slunečních observatoří), jejichž data byla v této práci použita.

Číslo stanice	Název stanice	Zem. šířka	Zem. délka	Nadmořská výška	Sledované roky	Poznámky
1	Grossenzesdorf	48°12′	16°34′	153 m	6	
2	Gmunden	47°55′	13°55′	426 m	12	
3	Hradec Králové	50°11′	15°50′	285 m	17	
4	Graz	46°58′	15°26′	340 m	12	
5	Kocelovice	49°28′	13°50′	519 m	15	
6	Kuchařovice	48°53′	16°05′	334 m	16	
7	Kremsmünster	48°03′	14°08′	383 m	8	oblačnost neměřena
8	Langelois	48°28′	15°42′	210 m	8	
9	Ostrava-Poruba	49°48′	18°15′	242 m	11	
10	Retz	48°46′	15°55′	242 m	9	oblačnost neměřena

Obr. 1: Mapa meteorologických stanic (slunečních observatoří), jejichž data byla v této práci použita.



Všechny testované metody (s výjimkou metody Klabzubovy) potřebují jako vstup denní (resp. hodinovou) sumu extraterestrického záření (Q_a). Pro potřeby srovnání jednotlivých metod byly hodnoty Q_a počítány způsobem, jež uvedl Allen *et al.* (1998), rovnice 21 (denní hodnoty) a rovnice 28 (hodinové hodnoty). Hodnota solární konstanty $0.0820 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$, empirické koeficienty potřebné pro metody Ångströmovu, Hargreavesovu a Supitovu byly interpolovány z map dostupných na adrese <http://home.concepts-ictl.nl/~iwan-supit/radiation> (2003).

1. **Ångströmová metoda** (Martínez-Lozano *et al.*, 1984)
2. **Klabzubova metoda** (Klabzuba *et al.*, 2000)
3. **Hargreavesova metoda** (Hargreaves *et al.*, 1985)
4. **Thorntonova metoda** (Thornton a Running, 1999)
5. **Donatelliho metoda** (Donatelli a Campbell, 1998)
6. **Winslowova metoda** (Winslow *et al.*, 2001)
7. **Supitova metoda** (Supit, Van Kappel, 1998)

ad1) Skutečná doba trvání slunečního svitu je uznávaná a pravděpodobně nejužívanější veličina pro výpočet denních sum globální radiace. Proto jako základní referenční metoda byla zvolena **metoda Ångströmová** (v podobě, kterou zpracoval Martínez-Lozano *et al.*, 1984). Výpočet touto metodou lze popsat:

$$Q = Q_a * (A + B * (n/N)) \quad (1)$$

Q	= denní suma globální radiace	$(\text{MJ m}^{-2} \text{ den}^{-1})$
Q_a	= denní suma extraterestrického záření	$(\text{MJ m}^{-2} \text{ den}^{-1})$
A a B :	Ångströmovy koeficienty	$(-)$
n	= skutečná doba slunečního svitu	(h^{-1})
N	= astronomicky možná doba slunečního svitu	(h^{-1})

Výpočet extraterestrické radiace lze provést podle rovnice (2):

$$Q_a = \sin_h * s \quad (2)$$

$$\sin_h = \cos_\delta * \cos_\theta * \cos_\tau + \sin_\delta * \sin_\theta \quad (3)$$

\sin_h	-	výška slunce
s	-	solární konstanta * radius vektor
δ	-	deklinace
θ	-	zeměpisná šířka
τ	-	hodinový úhel

ad2) **Metoda Klabzubova** je založena na statistickém vztahu mezi relativní dobou slunečního svitu daného dne (podle juliánského kalendáře) a denní solární radiací. Byla odvozena z dlouhodobě sledovaných dat jedné stanice (též zahrnutých v této práci) a ukazuje se být velmi dobrá zvláště během vegetačního období. Hlavní výhodou Klabzubovy metody (ve srovnání s metodou Ångströmovou) je její použitelnost bez znalosti potřebných specifických koeficientů pro konkrétní lokalitu.

$$Q = 7,19 + 0.2508 n/N - 9,28 * 10^{-6} (n/N + 22,9) (JD-174,7)^2 \quad (4)$$

JD = juliánský den

ad3) **Hargreavesova metoda** je vhodná také pro stanovení hodinových sum slunečního záření. Byla navržena pro případy, kdy jsou k dispozici pouze záznamy maximální a minimální teploty a právě v takových případech se často užívá.

$$Q = Q_a * A_h * (T_{max} - T_{min})^{1/2} + B_h \quad (5)$$

T_{max} – maximální teplota	(°C)
T_{min} - minimální teplota	(°C)
A_h = empirická konstanta	(°C ^{-0.5})
B_h – empirická konstanta	(MJ m ⁻² d ⁻¹)

ad4) Zdánlivě složitější **Thortonova metoda** vyžaduje jako základní vstupy hodnoty denních maximálních a minimálních teplot a denní úhrn srážek.

$$Q = Q_a * T_{f,max} * T_{t,max} \quad (6)$$

$T_{f,max}$ – je maximální denní transmitance na měřené lokalitě (jasný den)	(-)
$T_{t,max}$ - je korekční faktor pro zataženou oblohu	(-)

ad5) Na obdobném přístupu je založena **metoda Donatelliho** s rozdílem ve způsobu výpočtu transmisivity (funkce, empirické koeficienty).

$$Q = Q_a * tt_i \quad (7)$$

tt_i je atmosférická transmisivita	(-)
--------------------------------------	-----

ad6) **Metoda Winslowova** detailně rozpracovává transmitanci atmosféry. Má univerzální použitelnost pro všechny zeměpisné šířky na rozdíl od metod (3, 4, 5), které nejsou příliš spolehlivé pro rovníkové a arktické (antarktické) klimatické pásmo. Empirický faktor β má hodnotu 1,041.

$$Q = Q_a * [1 - \beta * e_s(T_{\min}) / e_s(T_{\max})] * \tau_{cf} D \quad (8)$$

D = korekční faktor pro chybu způsobenou různou délkou dne (-)
 β = empirický faktor pro lokalitu (-)
 $e_s(T_{\min})$ = tlak nasycených vodních par při minimální teplotě (Pa)
 $e_s(T_{\max})$ = tlak nasycených vodních par při maximální teplotě (Pa)

$$\tau_{cf} = (\tau_o * \tau_a * \tau_v)^{P/P_0} \quad (9)$$

τ_o = transmitance čisté a suché atmosféry,
 τ_a = faktor transmitance aerosolu a ozónu (pro výpočet byl roven 1)
 τ_v = faktor ovlivnění transmitance vodními parami
 P/P_0 = faktor nadmořské výšky

ad7) Oblačnost je meteorologickým prvkem často měřeným značným počtem stanic, proto byla do porovnání zahrnuta i **metoda Supitova**. Upravuje a zpřesňuje metodu Hargreavesovu; odvozuje svou empirickou rovnici od oblačnosti v kombinaci s denní maximální a minimální teplotou. Používání této metody je v současnosti rozšířeno v systémech sledujících růst plodin (Crop Growth Monitoring System) po celé Evropě a mnoha částech světa (Supit, 1997).

$$Q = Q_a * [A_s * (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} + B_h * (1 - CC / 8)^{1/2}] + C_s \quad (10)$$

CC – celková oblačnost během dne (1/8)
 A_s - empirická konstanta ($^{\circ}C^{-0.5}$)
 B_h - empirická konstanta (-)
 C_s - empirická konstanta ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)

Po vypočtení údajů denního globálního slunečního záření jednotlivými metodami byly takto získané údaje porovnány s naměřenými hodnotami. Pro porovnání přesnosti byly jako měřítka použity statistické ukazatele střední kvadratická chyba RMSE (root mean square error) a střední chyba MBE (mean bias error). RMSE se počítá:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{observed} - Q_{estimated})^2}{N_{observed}}}$$

kde $Q_{observed}$ a $Q_{estimated}$ zastupují měřené a vypočítané údaje globální radiace ($MJ.m^{-2}.den^{-1}$) a $N_{observed}$ je počet pozorování. MBE se počítá:

$$MBE = \frac{\sum (Q_{observed} - Q_{estimated})}{N_{observed}}$$

Pro lepší znázornění vztahů mezi naměřenými a vypočtenými údaji byly sestrojeny regresní křivky a vypočítány koeficienty determinace jak pro celý rok, tak zvlášť pro „studený půlrok“ (říjen-březen) a zvlášť pro „teplý půlrok“ (duben-září).

VÝSLEDKY

Tab. 2 zachycuje statistické hodnocení regresní závislosti. Průměrný koeficient determinace (R^2) je nejvyšší u metod založených na skutečné době slunečního svitu (Ångström, Klabzuba) a dále u metody Supitovy (kombinace teploty s oblačností). Tyto metody vykazují hodnotu R^2 v průběhu celého roku vyšší než 0.90, přičemž sklon regresní přímky procházející počátkem se blíží 1:1. Zbylé čtyři metody můžeme podle vysvětlené variability seřadit sestupně takto: Winslow, Donatelli, Thornton a Hargreaves. Z obr. 2 je zřejmé, že při použití jiných predikátorů než skutečné doby slunečního svitu se odchylka mezi měřeními a vypočítanými hodnotami Q významně zvyšuje. Nicméně při použití Winslowovy metody (teplota a úhrn srážek jako vstupy) můžeme očekávat poměrně uspokojivé výsledky.

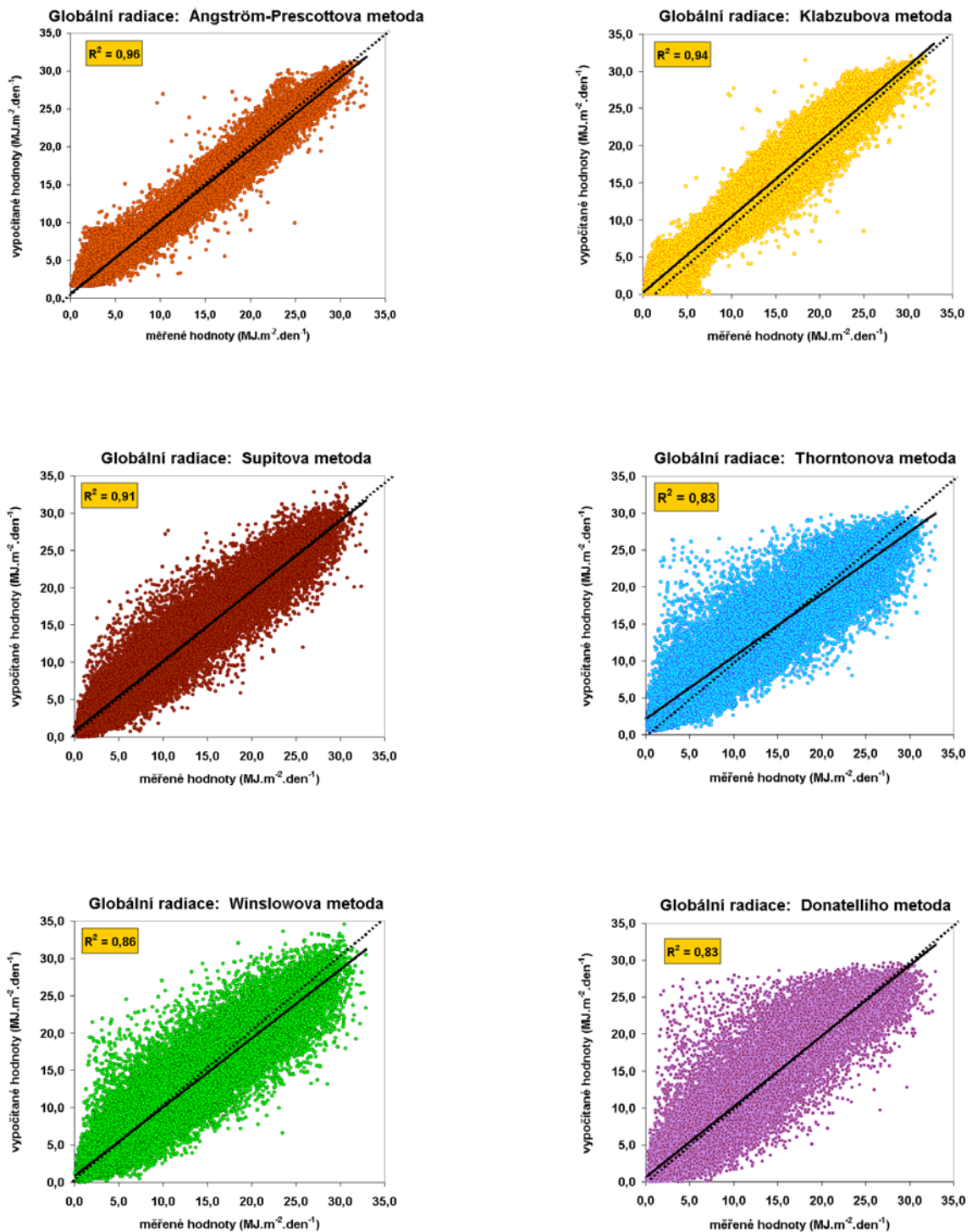
Hodnoty MBE kolísaly v rozmezí od 0.94 do 1.78 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$) v závislosti na použité metodě a ročním období. Nejvyšší odchylky dosáhla metoda Klabzubova během studeného půlroku (říjen-březen). Všeobecně je možno říci, že spolehlivost všech metod je v průběhu vegetačního období (teplého půlroku) vyšší. To je způsobeno tím, že při nízkých hodnotách přicházejícího záření v zimním období vede i malý nedostatek ve výpočtu k relativně vysoké statistické odchylce. RMSE vykazuje v průběhu roku opačný trend než MBE; absolutní hodnoty RMSE proto analogicky dosahují maxima během letních měsíců. RMSE pro Ångströmovu metodu (průměr z 10 stanic) je menší než 2.33 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$) s relativními hodnotami RMSE v rozmezí 10.7-31.8%. RMSE pro výstupy Supitovy metody je v rozmezí 0.85-3.38 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$) a relativní RMSE mezi 19.2 a 43.7%, zatímco tytéž parametry pro Winslowovu metodu jsou 1.26-4.55 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$) a 20.6-50.3%. Zatímco jednotlivé stanice nevykazují významný rozdíl v relativních hodnotách RMSE, zcela jasný je rozdíl v hodnotách jejich MBE. Nejnížší roční MBE byla zaznamenána v Kocelovicích a Kuchařovicích, nejvyšší odchylka (bez ohledu na použitou metodu) pak v Ostravě-Porubě.

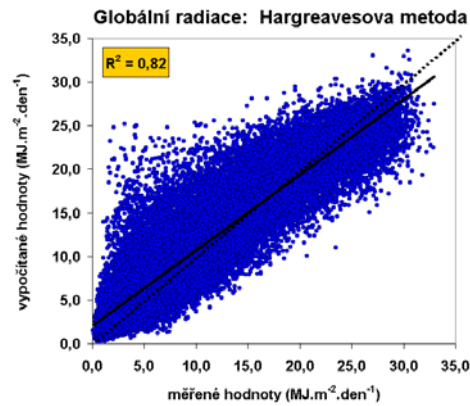
Tab. 2: Souhrnný přehled všech metod je vyjádřen pomocí odklonu křivky lineární regrese procházející počátkem (0) od přímky 1:1. Navíc udává i koeficient determinace lineární regrese.

Metoda							
	<i>Ångström</i>	<i>Klabzuba</i>	<i>Supit*</i>	<i>Thornton</i>	<i>Winslow</i>	<i>Hargreaves</i>	<i>Donatelli</i>
Celý rok							
směrnice regresní křivky	0,99	1,30	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99
R2	0,96	0,93	0,90	0,79	0,85	0,79	0,83
*R2	0,96	0,94	0,91	0,82	0,86	0,82	0,83
Teplý půlrok (duben-září)							
směrnice regresní křivky	0,99	1,30	0,99	0,97	1,00	1,10	1,20
R2	0,91	0,89	0,76	0,51	0,62	0,23	0,56
*R2	0,92	0,89	0,80	0,66	0,71	0,64	0,66
Chladný půlrok (leden-březen a říjen-prosinec)							
směrnice regresní křivky	0,98	1,10	0,96	0,97	0,86	0,90	0,85
R2	0,91	0,93	0,83	0,60	0,70	0,62	0,68
*R2	0,92	0,93	0,83	0,67	0,72	0,68	0,68

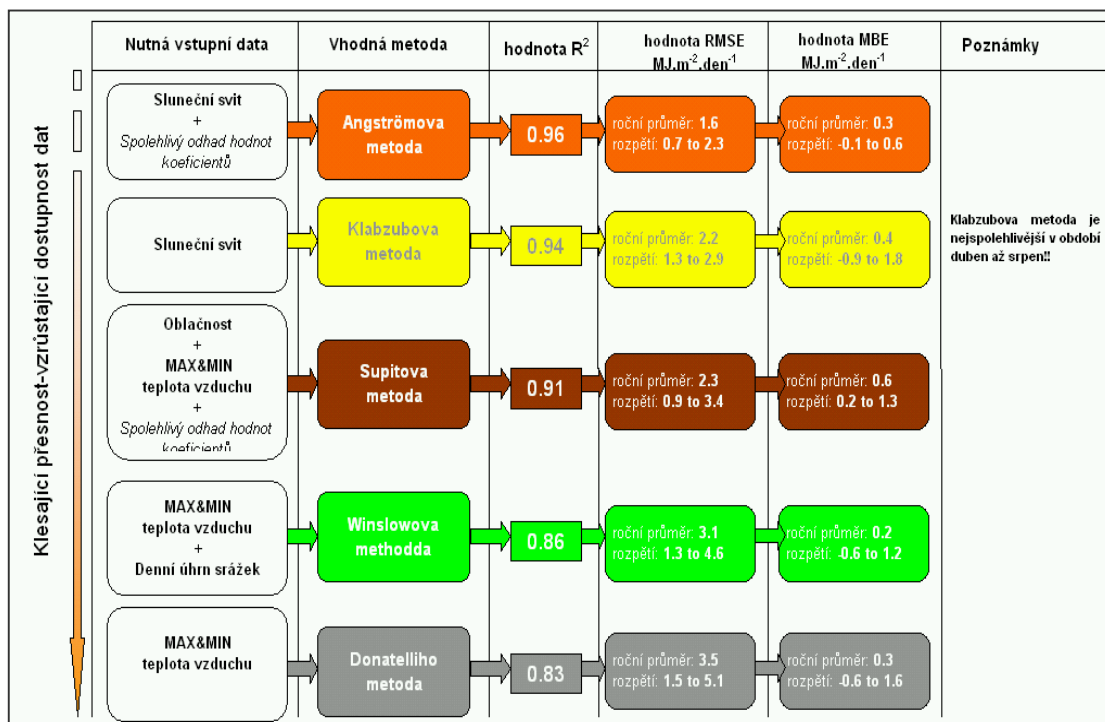
Hlavní výstup práce představuje obr. 3, který přehledně srovnává jednotlivé metody podle základních vstupů pro výběr nevhodnější metody výpočtu chybějících řad denních sum globální radiace. Zároveň tento diagram zobrazuje přesnost (koeficient determinace R^2) a odchylky všech testovaných metod v podmínkách střední Evropy (resp. České republiky a Rakouska). Je třeba připomenout, že těchto výsledků bylo dosaženo bez jakékoli další kalibrace a následného zpřesňování; pouze na základě rovnicemi vyžadovaných běžně dostupných konstant a koeficientů.

Obr. 2. Diagram rozptylu znázorňuje vztah mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami globální radiace. Jsou zobrazena data ze všech 10 stanic (z 8 v případě metody Supitovy), $n = 41\,640$ resp. $35\,427$ pozorovacích dní). Tečkovaná linie je přímka 1:1, zatímco plná čára značí lineární regresi neprocházející počátkem (0).





Obr.3 Diagram (rozhodovací schéma) sloužící pro snadný výběr vhodné metody pro výpočet denních hodnot solární radiace (bez možnosti přímého měření) podle dostupných dat; rovněž udává základní parametry dosažitelné přesnosti jednotlivých metod.



ZÁVĚR

Pomocí dat z 10 meteorologických stanic z České republiky a v Rakouska bylo srovnáno sedm metod výpočtu globální solární radiace. Výsledné průměrné regresní koeficienty a hodnoty odchylek RMSE a MBE ukazují, že vyšší spolehlivost vykazují ty metody, které používají jako predikátoru skutečnou dobu slunečního svitu. Z testovaných metod se v průběhu celého roku jeví jako nejpřesnější metoda Ångströмова (RMSE 1.6 MJ.m⁻².den⁻¹ a MBE 0.3 MJ.m⁻².den⁻¹). Pokud neexistuje možnost získání nutných koeficientů pro Ångströmovu metodu, pak může být aplikována metoda Klabzubova (pouze pro vegetační období). Pokud nejsou k dispozici hodnoty skutečné doby slunečního svitu, přichází v úvahu užití metody Supitovy (na základě oblačnosti a maximální a minimální teploty vzduchu), která rovněž poskytuje výsledky o vysoké přesnosti. Pokud není spolehlivě měřena oblačnost, může být aplikována metoda Winslowova (nahrazující oblačnost úhrnem srážek); pokud není měřen ani úhrn srážek, je řada na aplikaci metody podle Donatelliho.

PODĚKOVÁNÍ

Práce mohla být provedena a příspěvek publikován díky podpoře projektu GAČR 521/02/0827/A. Autoři by rádi poděkovali též Rakouské meteorologické službě (ZAMG) a Českému hydrometeorologickému institutu (solárnímu a ozónovému oddělení v Hradci Králové, SOO-HK), kteří poskytli data potřebná k provedení této práce.

POUŽITÁ LITERATURA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.: 1998, *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements.*, Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Ångström, A. (1924) Solar and terrestrial radiation. Q.J.R. Meteorol. Soc. 50, 121-125.
- Donatelli, M., Campbell, G.S. (1998) A simple method to estimate global radiation, Proceedings of the 5th ESA conference, Nitra, 133-134.
- Dubrovský, M.: Creating daily weather series with use of the weather generator. *Environmetrics*, 8: 409-424, 1997.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., Riley, P. (1985) Irrigation water requirement for the Senegal River Basin, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 111, 265-275.
- Klabzuba, J., Bureš, R., Kožnarová, V. (1999) Model výpočtu denních sum globálního záření pro použití v růstových modelech, Proceedings of the “Bioklimatologické pracovní dny 1999 Zvolen”, 121-122.
- Martínez-Lozano, J.A., Tena, F., Onrubia, J.E. and J. de la Rubia (1994) The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: review and bibliography, *Agric. For. Meteorol.*, 33, 109-128.

- Prescott J.A. (1940) Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. South Australia*, 64, 114-118.
- Richardson, C.W. (1981) Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Res.* 17, 182-190.
- Supit, I., van Kappel, R.R. (1998) A simple method to estimate global radiation, *Solar Energy*, 63, 147-160.
- Supit, I. (1997) Predicting national wheat production volumes using growth simulation results plus a trend function. *Agric. For. Meteorol.* 88, 199-214.
- Thornton, P.E., Running, S.W. (1999) An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation, *Agric. For. Meteorol.*, 93, 211-228.
- Winslow, J.C., Hunt, E.R., Piper, S. C. (2001) A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data, *Ecol. Modelling*, 143, 227-243.