

# VYUŽITÍ DENNÍCH TEPLOTNÍCH EXTRÉMŮ A ÚHRNU SRÁŽEK K ODHADU GLOBÁLNÍHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

M. Trnka

**Došlo: 22. ledna 2004**

## Abstract

TRNKA, M.: *Estimates of daily global solar radiation based on the daily temperature extremes and precipitation sums*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2004, LII, No. 5, pp. 13-28

Two methods for estimating daily global solar radiation ( $R_G$ ) based on the daily temperature extremes and precipitation sum are compared in the study. All parameters necessary for application of both methods were derived either from literature or from climatic characteristics easily available at the given meteorological stations excluding need for measured  $R_G$  data. The performance of both methods was assessed with a help of meteorological database including 4 stations in the Czech Republic (data were provided by the Czech Hydrometeorological Institute) and 6 in Austria (data provided by the Austrian Weather Service) containing in total 41 640 observational day. For each day in the database observed daily sum of  $R_G$ , daily maximum and minimum temperatures and precipitation sum were available. Coefficient of determination, slope of regression line forced through origin, mean bias error (MBE) and root mean square error (RMSE) were used as performance indicators. The first method proposed by Winslow *et al.* (2001) – Eq. (1) is capable to explain 86% of daily  $R_G$  variability, with systematic error represented by MBE equaling to  $0.19 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$  and random error indicated by RMSE reaching up to 3.09. The second method published by Thornton and Running (1999)–Eq. (2) was found to be in almost all parameters inferior to the Eq. (1) and thus the Eq. (1) is recommended to be used in the Central European region (up to 600 m above the sea level). This method might be recommended for stations where neither measured  $R_G$  or sunshine duration hours exist. However, one should take into consideration that relative MBE and RMSE are in some months higher than 10% and 30% respectively, which may compromise results of subsequent calculations made with use of estimated solar radiation data and alter the order of the method suitability.

global solar radiation, empirical models

## 1. ÚVOD

Hodnoty denních sum globálního záření ( $R_G$ ) jsou nepostradatelným vstupním údajem pro celou řadu aplikací v různých odvětvích výzkumné činnosti. V oblasti fyziologie rostlin slouží například jako základní vstupní proměnná ve výpočtech radiační a energetické bilance nebo při sledování procesů fotosyntézy, které jsou přímo závislé na využití dostupné-

ho slunečního záření a jeho konverzi na chemickou energii. V širším pohledu rostlinné výroby je dostupnost hodnot denních sum  $R_G$  nutným předpokladem použití řady metod výpočtu potenciální a aktuální evapotranspirace (Allen *et al.*, 1998), jež jsou používány v řadě prakticky významných aplikací, jakými jsou automatizované závlahové systémy, vyžítí a aplikace růstových modelů (Žalud, Dubrovský, 2002),

případně v oblasti metod hodnotící míru zemědělského sucha (Trnka *et al.*, 2003). Zároveň je znalost hodnot evapotranspirace základní vstupní veličinou řady modelů hydrologických. Vzhledem k tomu, že globální radiace vstupuje jako řídicí proměnná do řady aplikací, byla v některých studiích analyzována jak velikost chyby měření, tak i nepřesnosti odhadu denních hodnot  $R_G$  způsobených náhradními metodami výpočtu. Tyto studie prokázaly, že nadhodnocení hodnot  $R_G$  o 4 % vede k chybě ve výpočtu potenciální evapotranspirace v intervalu 1,6–3,6 % v závislosti na ročním období (Llasat a Snyder, 1998). Lindsey a Farnsworth (1997) zjistili, že použití oblačnosti jako prediktora k výpočtu hodnot  $R_G$  způsobuje chybu v odhadech výparu v průměru 14 % (výjimečně až 39 %). Použití hodnot  $R_G$  vypočtených na základě jiných meteorologických prvků bylo testováno i v případech růstových modelů. Detailní studie De Jonga a Stewarta (1993) přinesla zjištění, že i použití metody s relativně velkou přesností odhadu  $R_G$  (odmocnina průměrné kvadratické chyby v rozmezí 10,7–14,3 %) vede k chybě odhadovaného výnosu jarní pšenice v řádu 300–600 kg.ha<sup>-1</sup>. Z tohoto důvodu je nutné, před použitím náhradních metod výpočtu  $R_G$  v následných aplikacích, znát chybu, se kterou jsou hodnoty  $R_G$  stanoveny a jak tato chyba ovlivňuje konečné výstupy (např. hodnoty evapotranspirace, simulovaného výnosu apod.).

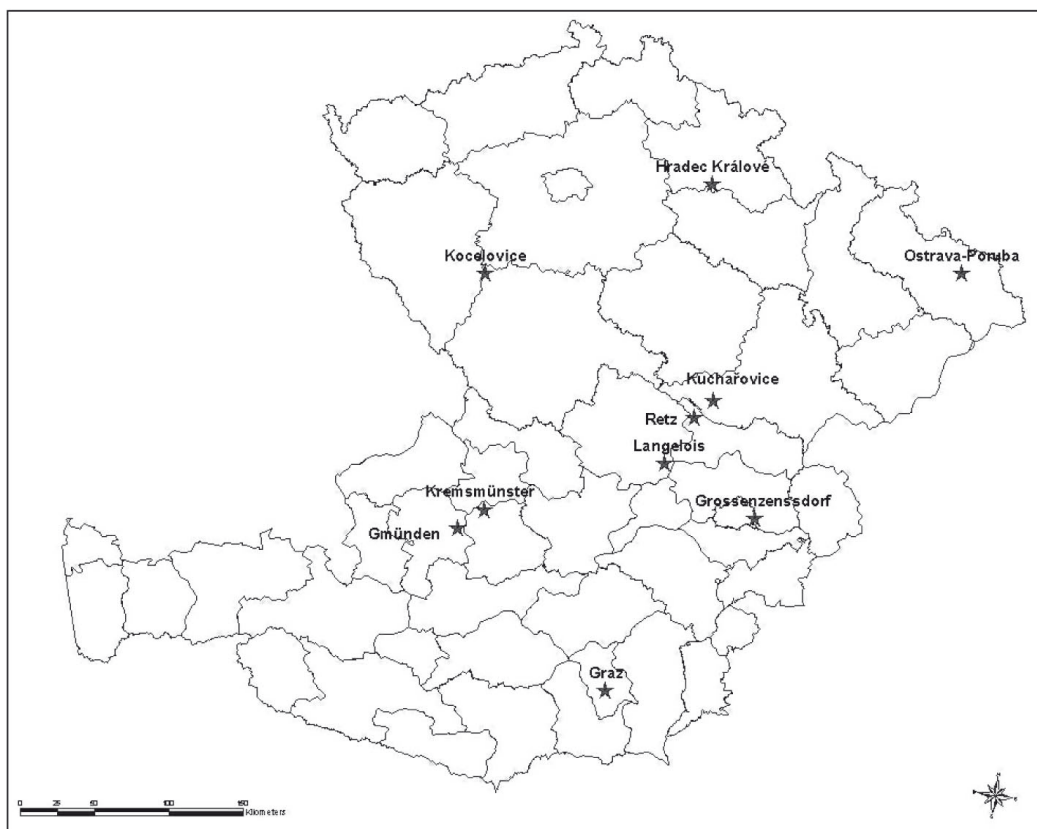
Přes již uvedený význam globální radiace a zřejmou nutnost zajistit co nejpřesnější hodnoty  $R_G$  pro řadu aplikací, je hustota stanic s měřením  $R_G$  několikanásobně menší než v případě většiny ostatních veličin a poměr stanic provádějících tato měření ku celkovému počtu klimatologických stanic se pohybuje od 1:10 v Německu (Oesterle, 2001) přes 1:20 v Rakousku a České republice po 1:500 v celosvětovém měřítku (Thornton *et al.*, 1997). Naproti tomu velké množství klimatologických stanic provádí měření doby trvání slunečního svitu a všechny pak zaznamenávají maximální ( $T_{MAX}$ ) a minimální ( $T_{MIN}$ ) teplotu spolu s denním úhrnem srážek ( $P$ ). Z tohoto důvodu byla vyvinuta řada metod pro odhad denních sum  $R_G$  na základě běžně dostupných meteorologických prvků, zejména doby trvání slunečního svitu (např. Angström, 1924; Klabzuba *et al.*, 1999) oblačnosti (např. Kasten a Czeplak, 1984; Supit a van Kappel, 1998), denních teplotních extrémů (např. Bristow a Campbell, 1984; Donatelli a Campbell, 1998) a také kombinaci teplotních extrémů s denním úhrnem srážek (Winslow *et al.*, 2001; Thornton a Running, 1999; Liu a Scott, 2001). Většina z těchto metod vyjadřuje hodnotu slunečního záření dopadajícího na zemský povrch ( $R_G$ ) jako poměrnou část z celkové denní extraterestrické radiace  $R_A$ , tj. slunečního záření dopadajícího na jednotku plochy na horní hranici atmosféry. Velikost této části je pak určována propustností atmosféry vyjádřené její

transmitancí. Fyzikální procesy probíhající mezi slunečním zářením a atmosférou, kterou záření prochází, jsou velmi složité, nicméně vztah mezi propustností atmosféry a některými meteorologickými prvky lze vyjádřit empiricky s poměrně vysokou přesností (Liu a Scott, 2001). Zatímco využití doby trvání slunečního svitu pro odhad  $R_G$  má na našem území dlouhou tradici (např. Klabzuba *et al.*, 1999; Vaníček, 1985), metody založené na vztahu mezi propustností atmosféry a denními hodnotami  $T_{MAX}$ ,  $T_{MIN}$  a  $P$  jsou využívány poměrně omezeně. Vzhledem k tomu, že v posledních letech byl učiněn výrazný pokrok ve vývoji metod založených právě na těchto třech snadno dostupných prediktorech, zaměřuje se tento příspěvek na ověření použitelnosti dvou metod v regionu střední Evropy publikovaných v posledních pěti letech.

## 2. MATERIÁL A METODY

Poloha vybraných deseti stanic, které se nacházejí na území ČR a Rakouska, je patrná z Obr. 1. Vzhledem k tomu, že pracoviště Ústavu krajinné ekologie se zabývá především aplikací růstových modelů pro pšenici ozimou a ječmen jarní v podmínkách střední Evropy, byly vybrány pouze stanice s nadmořskou výškou menší než 600 m n. m. (Tab. I), což je přibližně hranice, nad níž se nevyskytují významné plochy zemědělsky obdělávané půdy. Meteorologické stanice, jejichž rozsáhlé databáze byly pro účely práce využity, patří do sítě České hydro meteorologického ústavu (ČHMÚ) a Rakouské meteorologické služby (ZAMG), které také poskytly všechna potřebná data k provedení této studie. Pro každou z lokalit byly získány kompletní datové soubory naměřených hodnot  $R_G$ ,  $T_{MAX}$ ,  $T_{MIN}$  a  $P$ . Přestože metoda měření denního úhrnu srážek (tedy v období od 7 hodin ráno středního místního času (SMČ) do 7 hodin ráno následujícího dne) znamená, že minimálně část srážek může spadat do následujícího dne, nebylo provedeno žádné zohlednění tohoto jevu, neboť se jedná o konvenční způsob záznamu srážek v rámci obou institucí doporučený Světovou meteorologickou organizací (WMO). Navíc nutnost další opravy vstupních dat by snižovala aplikovatelnost testovaných metod. Práce byly zahájeny s použitím vstupní databáze pro celkem 16 stanic, pro něž byly k dispozici soubory všech nezbytných meteorologických prvků. Na základě vstupní analýzy zaměřené především na úplnost a spolehlivost dat bylo do studie zařazeno pouze deset stanic. Ve výsledné databázi tak byly ponechány pouze ty ročníky, u nichž byla k dispozici kompletní denní data pro všechny meteorologické prvky. Celkem pak bylo pro další analýzy použito 114 ročníků (tj. 41 640 pozorovacích dní), přičemž počet ročníků s kompletními daty se na jednotlivých stanicích pohyboval od 6 do 16 (viz. Tab. I).

Denní hodnota  $R_A$  nezbytná pro obě použité me-



1: Mapa meteorologických stanic použitých v rámci studie (východní část Rakouska není zobrazena vzhledem k charakteristikám použité Křovákovy projekce)

I: Přehled meteorologických stanic použitých ve studii<sup>a)</sup>

| Název              | zem.<br>šířka | zem.<br>délka | Nadm.<br>výška<br>(m) | $T_{\text{prům.}}$<br>(°C) | Srážky <sup>b)</sup><br>(mm) | Ročníky použité pro výpočty<br>$R_G$ <sup>c)</sup> | Počet let |
|--------------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
| Gmunden            | 47°55′        | 13°55′        | 426                   | 9.9                        | 1261                         | 84 – 90; 93 – 95; 97 – 01                          | 12        |
| Graz               | 46°58′        | 15°26′        | 340                   | 10.8                       | 822                          | 90 – 01                                            | 12        |
| Gross – Enzersdorf | 48°12′        | 16°34′        | 153                   | 10.7                       | 546                          | 96 – 01                                            | 6         |
| Hradec Králové     | 50°11′        | 15°50′        | 285                   | 8.5                        | 612                          | 84 – 00                                            | 17        |
| Kocelovice         | 49°28′        | 13°50′        | 519                   | 7.5                        | 591                          | 85; 87 – 00                                        | 15        |
| Kremsmünster       | 48°03′        | 14°08′        | 383                   | 9.7                        | 1044                         | 89; 90; 93; 96; 97; 99 – 01                        | 8         |
| Kuchařovice        | 48°53′        | 16°05′        | 334                   | 8.5                        | 484                          | 84 – 99                                            | 16        |
| Langenlois         | 48°28′        | 15°42′        | 210                   | 10.1                       | 473                          | 92; 93; 95; 96; 98 – 01                            | 8         |
| Ostrava – Poruba   | 49°48′        | 18°15′        | 242                   | 8.3                        | 721                          | 85 – 91; 94; 96; 98; 99                            | 11        |
| Retz               | 48°46′        | 15°55′        | 242                   | 10.2                       | 431                          | 81; 82; 94; 95; 97 – 01                            | 9         |

<sup>a)</sup> Hodnoty roční průměrné teploty ( $T_{\text{prům.}}$ ) a průměrného ročního úhrnu srážek byly vypočteny jako průměr z ročníků použitých pro následné výpočty (tj. sloupec 7). Referenční období se tedy u jednotlivých stanic liší a kolísá v rozmezí 6–16 let.

<sup>b)</sup> Průměrný roční úhrn srážek na uvedené lokalitě

<sup>c)</sup> Vyznačené ročníky obsahující kompletní data pro všechny parametry použité pro následné výpočty

tody byla vypočtena metodou Duffieho a Beckmana (1980), která bere v úvahu mj. i relativní vzdálenost Země a Slunce kolísající v rozmezí  $\pm 3,3\%$ , jež byla některými autory dřívějších studií zanedbávána (např. Bristow a Campbell, 1984). Hodnota solární konstanty vychází z práce Froliche (1982) a činí  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  tj.  $118,1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Tato hodnota je obecně doporučována (např. Allen *et al.*, 1998) a byla potvrzena i nedávnou studií založenou na detailní 24leté řadě pozorování (Gueymard, 2003).

Po analýze vstupních dat následovalo hodnocení rozložení naměřených hodnot  $R_G$  v rámci databáze, přičemž bylo zvoleno 11 intervalů s krokem  $3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Jak je zřejmé z Obr. 2a, 60 % hodnot leží mezi hodnotami 0–12  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Aby bylo možné posoudit chování obou metod za dnů s různou hodnotou transmisivity atmosféry, byly všechny pozorovací dny v databázi zařazeny do kategorií na základě poměru hodnot  $R_G$  vs.  $R_A$  (Obr. 2b). Hodnoty poměru blízké 1 představují dny s vysokou transmisivitou a naopak. Jak je z Obr. 2b zřejmé, je rozdělení uniformní, s výjimkou hodnot poměru  $R_G$  vs.  $R_A$  vyšších než 0,70.

Většina v současnosti používaných metod založených na predikci denní sumy  $R_G$  na základě denních teplotních extrémů (včetně obou metod testovaných v této studii) vychází z konceptu navrženého před 20 lety Bristowem a Campbelllem (1984). Původní metoda redukuje hodnotu denní  $R_A$  o tu část záření, která je zachycena atmosférou (převážně oblaky), přičemž zavádí termín transmisivity ( $\tau$ ). Transmisivita pak může být vypočtena na základě denní teplotní amplitudy a místně specifických empirických koeficientů. Relativní přesnost odhadu získala této metodě značnou oblibu. Na druhé straně je však nutné připomenout, že tato metoda vyžaduje pro stanovení koeficientů dostatečně velký „učební soubor“ současných pozorování  $R_G$ ,  $T_{\text{MAX}}$ ,  $T_{\text{MIN}}$  a  $P$ , což snižuje její obecnou použitelnost. Hlavní pozornost se proto při práci s touto metodou upřela na odstranění nutnosti stanovovat koeficienty z učebního souboru s využitím explicitního zavedení denního úhrnu srážek jako vstupní proměnné, která je podobně jako hodnoty  $T_{\text{MAX}}$  a  $T_{\text{MIN}}$  na všech standardních meteorologických stanicích k dispozici. Této problematice bylo věnováno i několik rozsáhlých studií (např. Winslow *et al.*, 2001; Thornton a Running, 1999). Metoda navržená Winslowem *et al.* (2001) – dále jen rovnice (1) – nabízí globálně aplikovatelnou rovnici ve tvaru:

$$R_G = \tau_{cf} D \left[ 1 - \frac{\beta e_s(T_{\text{min}})}{e_s(T_{\text{max}})} \right] R_A, \quad (1)$$

kde  $e_s(T_{\text{min}})$  a  $e_s(T_{\text{max}})$  jsou hodnoty tlaku nasycené vodní páry při teplotách  $T_{\text{MIN}}$  a  $T_{\text{MAX}}$ . Proměnná  $\tau_{cf}$  vyjadřuje atmosférickou transmitanci a je vypočte-

na jako funkce zeměpisné šířky, nadmořské výšky a průměrné roční teploty. Činitel  $D$  pak koriguje chybu vyvolanou rozdílem mezi časem dosažení denní maximální teploty a západem slunce. Parametr  $\beta$  zůstává konstantní, s výjimkou horských oblastí s extrémními hodnotami denní amplitudy. Vzhledem ke skutečnosti, že nejvyšší nadmořská výška v souboru použitých stanic je rovna 519 m n. m., byla pro výpočty použita hodnota parametru  $\beta$  navržená autory metody, tj. 1,041.

Metoda navržená Thorntonem a Runningem (1999) – dále jen rovnice (2) – vychází rovněž z metody navržené Bristowem a Campbelllem (1984) a byla formulována v následujícím tvaru:

$$R_G = R_A \times T_{t,\text{max}} \times T_{f,\text{max}}, \quad (2)$$

kde  $T_{t,\text{max}}$  představuje maximální denní transmitanci (za jasného dne) na dané lokalitě a závisí na nadmořské výšce lokality a napětí vodních par v přízemní vrstvě v daném dni v roce. Proměnná  $T_{f,\text{max}}$  představuje poměrnou část  $T_{t,\text{max}}$ , která se daný den realizovala (tj. korekce na stupeň oblačnosti). Původní verze byla dále vylepšena (Thornton *et al.*, 2000) zavedením modelu pro odhad sněhové pokrývky a zavedením korekce pro zastíněný horizont. První z uvedených modifikací spolu s hodnotami empirických koeficientů odvozených pro podmínky vybraných rakouských stanic byla použita i pro účely této studie. Hodnoty koeficientů uvedené v této studii se výrazně neliší od hodnot publikovaných v původní práci Thorntona a Runninga (1999) a jsou použitelné pro území střední Evropy (Thornton, 2003, osobní sdělení).

Přesnost odhadu  $R_G$  byla hodnocena s využitím průměrné odchylky (MBE), která je považována za vhodný indikátor systematické chyby, zatímco odmocnina průměrné kvadratické chyby (RMSE) byla použita jako nástroj pro hodnocení chyby nesystematické (Davies a McKay, 1989).

MBE byla vypočtena na základě následujícího vzorce:

$$\text{MBE} = \frac{\sum (Q_{\text{merena}} - Q_{\text{vypoctena}})}{N_{\text{mereni}}}, \quad (3)$$

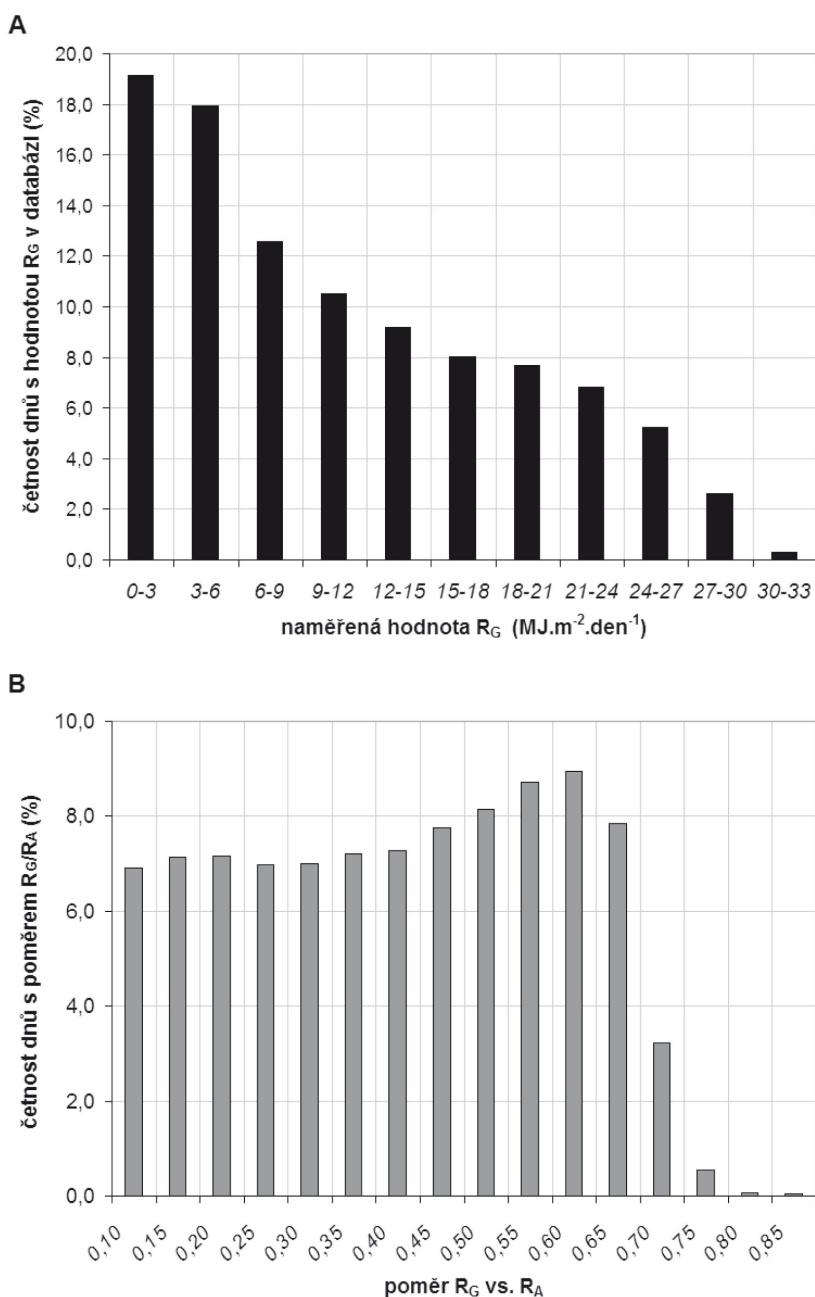
kde  $Q_{\text{merena}}$  a  $Q_{\text{vypoctena}}$  představují naměřené, resp. příslušnou metodou vypočtené denní sumy  $R_G$  ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ ) a proměnná  $N_{\text{mereni}}$  symbolizuje počet pozorování.

Hodnota RMSE byla odvozena na základě následujícího vzorce:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (Q_{\text{merena}} - Q_{\text{vypoctena}})^2}{N_{\text{mereni}}}}. \quad (4)$$

Oba statistické ukazatele byly vypočteny pro jednotlivé měsíce a roční úhrny v celé databázi stanic a jsou vyjádřeny jak v absolutních jednotkách, tj.  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , tak jako podíl absolutní hodnoty příslušného indexu a průměrné hodnoty  $R_G$  v příslušném období. Pro posouzení spolehlivosti obou metod stanovení  $R_G$  a kvantifikaci vysvětlené variability byla vypočtena hodnota koeficientu determinace a také

hodnota směrnice regresní přímky procházející nulou. Kromě denních hodnot  $R_G$  byla též posuzována přesnost obou metod pro výpočet měsíčních sum. Uvedené metody analýzy výsledných dat byly rovněž použity k posouzení přesnosti výpočtu  $R_G$  v rámci jednotlivých intervalů naměřených denních sum  $R_G$  (Obr. 2a) a také pro dny s definovaným poměrem  $R_G/R_A$  (Obr. 2b).



2: Procenta pozorovacích dnů náležejících do jednotlivých kategorií (A). Rozdělení pozorovacích dní podle hodnoty pozorované denní sumy  $R_G$ ; (B) Rozdělení pozorovacích dní podle hodnoty poměru  $R_G/R_A$ . V obou případech je počet dní vyjádřen jako poměrná část z celkového počtu pozorovacích dní použitých ve studii, tj. 41 640.

## 3. VÝSLEDKY A DISKUSE

Jak vyplývá z Tab. II, variabilita naměřených hodnot  $R_G$  vysvětlená rovnicí (1) je vyšší (86 %) než v případě rovnice druhé (82 %), přičemž existují jisté rozdíly mezi jednotlivými lokalitami. Obecně byly nejvyšší hodnoty  $R^2$  zjištěny u stanic s nejdelšími řadami dat, tj. Hradec Králové, Kocelovice a Kuchařovice. Hodnoty směrnice regresních přímek procházejících 0 jsou u obou rovnic menší než 1, a to zejména u rovnice (2), z čehož lze odvodit tendenci obou metod

mírně podhodnocovat denní sumy  $R_G$ . Hodnota koeficientu determinace nevykazuje výraznou, na lokalitě závislou proměnlivost, (Tab. II), nicméně totéž nelze konstatovat o hodnotě směrnice regresní přímky. Tendence nadhodnocovat vypočtené hodnoty  $R_G$  byla u obou metod pozorována v případě stanic Ostrava-Poruba a Graz (rozsáhlé průmyslové aglomerace na severu a jihu studované oblasti), zatímco nejvýraznější tendence podhodnocovat hodnoty  $R_G$  byla zjištěna na rurální stanici Gross-Enzersdorf.

II: Přehled statistických ukazatelů pro obě statistické metody, kde  $R^2$  – koeficient determinace; směrnice – směrnice přímky lineární regrese procházející počátkem; MBE – průměrná střední odchylka a RMSE – odmocnina střední kvadratické odchylky.

| Název stanice    | rovnice (1)           |                        | rovnice (2)        |             | rovnice (1)           |                    | rovnice (2)        |             | rovnice (1)           |              | rovnice (2)        |              |
|------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------|
|                  | Winslow <i>et al.</i> |                        | Thornton a Running |             | Winslow <i>et al.</i> |                    | Thornton a Running |             | Winslow <i>et al.</i> |              | Thornton a Running |              |
|                  | <sup>a)</sup> $R^2$   | <sup>b)</sup> směrnice | $R^2$              | Směrnice    | MBE                   |                    | MBE                |             | RMSE                  |              | RMSE               |              |
|                  |                       |                        |                    |             | abs. <sup>c)</sup>    | rel. <sup>d)</sup> | abs.               | rel.        | abs.                  | rel.         | abs.               | rel.         |
| Gmunden          | 0,86                  | 0,97                   | 0,85               | 0,95        | 0,17                  | 1,75               | 0,37               | 3,86        | 2,89                  | 30,13        | 3,11               | 32,40        |
| Graz             | 0,86                  | 0,99                   | 0,81               | 1,04        | 0,22                  | 1,93               | 1,21               | 10,48       | 3,00                  | 25,70        | 3,60               | 31,40        |
| Gross-Enzersdorf | 0,84                  | 0,89                   | 0,84               | 0,88        | -1,21                 | -10,10             | -0,92              | -7,60       | 3,50                  | 29,20        | 3,50               | 29,20        |
| Hradec Králové   | 0,88                  | 1,03                   | 0,86               | 0,96        | 0,70                  | 6,70               | 0,30               | 2,90        | 3,00                  | 28,40        | 3,00               | 28,80        |
| Kocelovice       | 0,88                  | 0,98                   | 0,85               | 0,94        | 0,05                  | 0,50               | -0,10              | -0,82       | 2,85                  | 26,38        | 3,06               | 28,31        |
| Kremsmünster     | 0,86                  | 0,89                   | 0,82               | 0,97        | -0,87                 | -7,61              | 0,32               | 2,80        | 3,25                  | 28,44        | 3,53               | 30,88        |
| Kuchařovice      | 0,88                  | 0,98                   | 0,86               | 0,96        | 0,03                  | 0,28               | 0,23               | 2,04        | 2,83                  | 25,81        | 3,00               | 27,09        |
| Langenlois       | 0,85                  | 1,03                   | 0,83               | 0,95        | 0,66                  | 5,98               | 0,17               | 1,56        | 3,31                  | 29,97        | 3,23               | 29,31        |
| Ostrava-Poruba   | 0,86                  | 1,11                   | 0,85               | 1,02        | 1,56                  | 15,60              | 1,03               | 10,25       | 3,49                  | 34,78        | 3,19               | 31,76        |
| Retz             | 0,82                  | 0,93                   | 0,82               | 0,95        | -0,59                 | -4,73              | 0,07               | 0,57        | 3,55                  | 28,49        | 3,17               | 27,80        |
| <b>Průměr</b>    | <b>0,86</b>           | <b>0,97</b>            | <b>0,82</b>        | <b>0,92</b> | <b>0,19</b>           | <b>1,70</b>        | <b>0,33</b>        | <b>3,00</b> | <b>3,09</b>           | <b>28,60</b> | <b>3,21</b>        | <b>29,74</b> |
| <b>STD</b>       |                       |                        |                    |             | <b>0,77</b>           | <b>7,09</b>        | <b>0,55</b>        | <b>4,94</b> | <b>0,27</b>           | <b>2,53</b>  | <b>0,21</b>        | <b>1,71</b>  |

<sup>a)</sup> Hodnoty koeficientu determinace pro regresní přímku nejlépe odpovídající datovému souboru

<sup>b)</sup> Hodnoty směrnice regresní přímky procházející počátkem – ideální hodnota 1.00

<sup>c)</sup> Hodnoty absolutní chyby jsou v uvedeny v MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>

<sup>d)</sup> Hodnoty relativní chyby jsou uvedeny v (%)

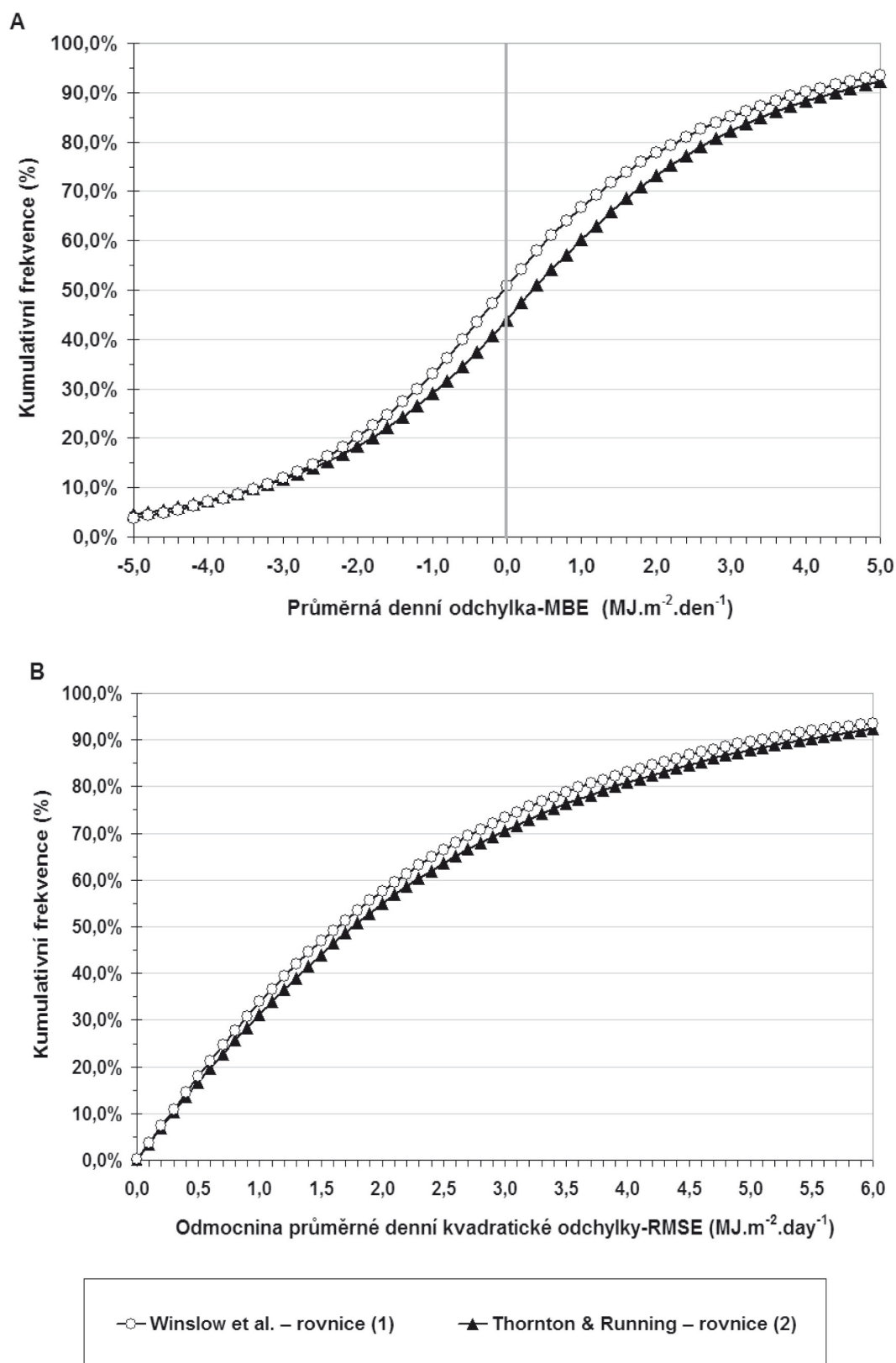
Zjištěné hodnoty koeficientu determinace u obou metod využívajících jako prediktory denní extrémy teplot a úhrn srážek odpovídají doposud publikovaným studiím z jiných geografických oblastí v mírném klimatickém pásmu. Na základě uvedených vstupních dat byla nejlepší z řady testovaných metod schopna vysvětlit 79 % variability pozorované  $R_G$  na 39 australských stanicích (Liu a Scott, 2001). Naproti tomu pro obdobnou metodu v podmínkách západokanadských provincií byla hodnota koeficientu determinace rovna pouze 0,57 (De Jong a Stewart, 1993). Hodnoty  $R^2$  zjištěné pro rovnici (1), tj. 0,82–0,88, odpovídají

tvrzením autorů metody (Winslow *et al.*, 2001), kteří pro stanice ležící mezi 35–55° sev. šířky odvodili hodnoty v intervalu 0,69–0,91. V případě rovnice (2) jsou hodnoty koeficientu determinace nižší, tj. 0,81–0,85, přičemž tyto hodnoty byly zjištěny i samotnými autory metody ve srovnatelných klimatických podmínkách (Thornton a Running, 1999). Obě uvedené metody nicméně vykazují v oblasti střední Evropy podstatně lepší výsledky než v teplém a vlhkém podnebí, jak dokumentují některé doposud publikované práce (Almeida a Landsberg, 2003). Křivky kumulativní frekvence hodnot MBE pro rovnici (1) a

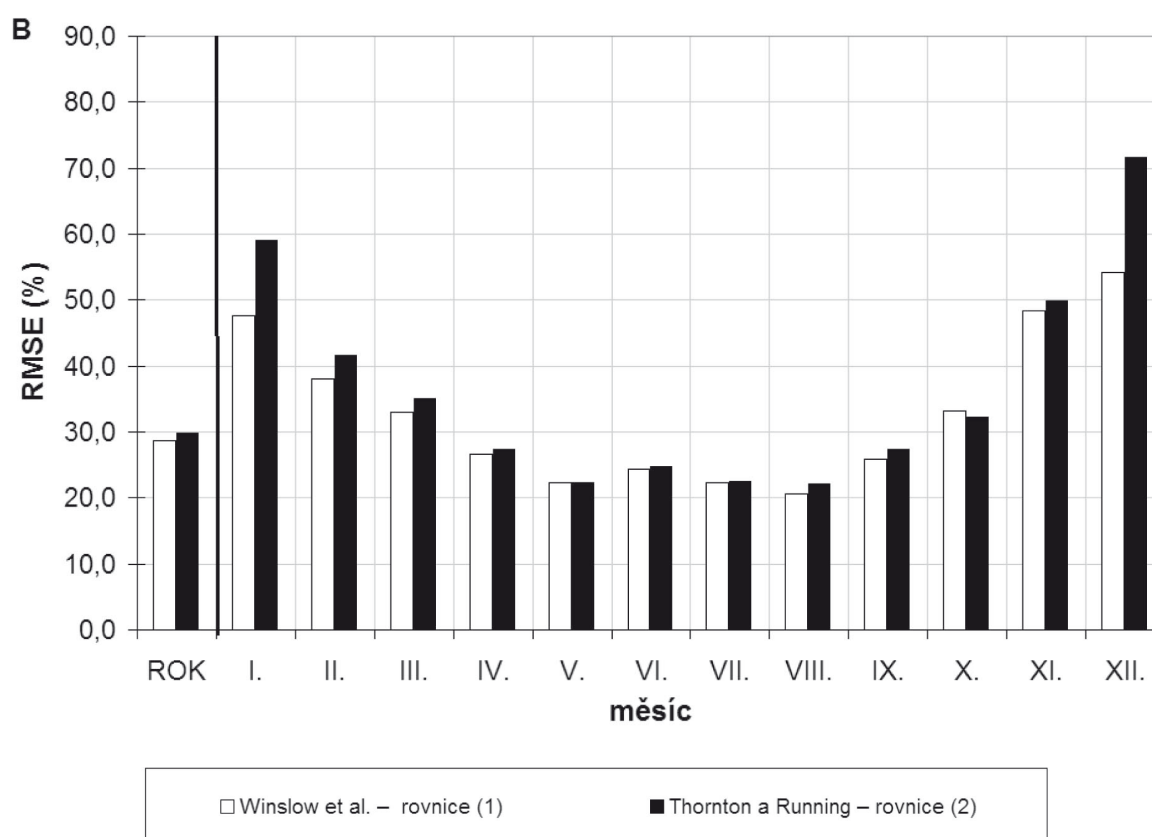
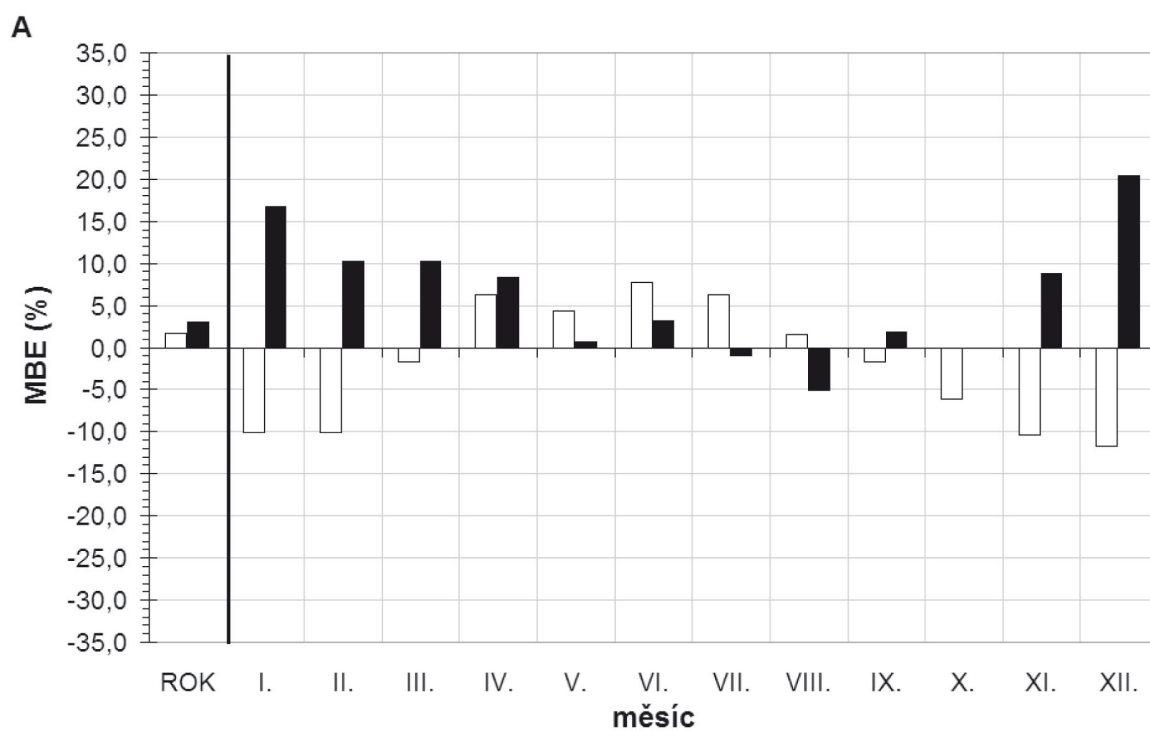
(2) nám dovolují konstatovat, že 85 % hodnot  $R_G$  bylo odhadnuto s chybou menší než  $\pm 5,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , přičemž v tomto intervalu nebyl mezi oběma metodami významný rozdíl (Obr. 3a). Nicméně rovnice (1) vykazovala znatelně lepší výsledky pro hodnoty odchylek v rozmezí  $\pm 1,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , kdy 33,7 % všech hodnot bylo vypočteno maximálně s uvedenou hodnotou odchylky, zatímco při použití rovnice (2) se v uvedeném intervalu nacházelo pouze 31,0 % všech hodnot. Průměrná roční hodnota MBE vycházející ze souboru všech pozorování v databázi je rovna  $0,19 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$  pro rovnici (1) a  $0,33 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$  pro rovnici (2). Jak ovšem vyplývá z Obr. 4a, hodnoty relativní MBE vykazují výrazný sezonní průběh, kdy kolísají v rozmezí  $-12,0 \%$  až  $8,1 \%$  v případě rovnice (1) a  $-5,2 \%$  až  $20,3 \%$  v případě rovnice (2). Z tabulky II rovněž vyplývá, že hodnoty systematické chyby (MBE) jsou na jednotlivých lokalitách výrazně (řádově 10x) menší než hodnoty chyby náhodné (RMSE), což v praxi znamená, že význam systematické chyby obou metod je pro běžné použití víceméně zanedbatelný. Obecně lze říci, že rovnice (1) vykazuje tendenci k nadhodnocování hodnot  $R_G$  v průběhu teplé části roku (duben–září) a podhodnocování v průběhu chladných měsíců, zatímco rovnice (2) vykazuje opačný trend. Pokud porovnáme hodnoty roční průměrné MBE na jednotlivých stanicích, dospějeme k obdobným závěrům, jako v případě směrnice regresní přímky. To znamená, že roční hodnota MBE je nejvyšší na stanicích Ostrava-Poruba a Graz a dosahuje hodnot přesahujících  $1,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Zejména v případě první stanice jde o fenomén pravděpodobně zapříčiněný průmyslovým znečištěním, neboť metody založené na trvání slunečního svitu (Trnka *et al.*, 2003), na rozdíl od rovnic (1) a (2), obdobnou tendenci na této stanici nevykazují. Diference mezi metodami pak lze vysvětlit tím, že pokles atmosférické transmittance z důvodu znečištění atmosféry ovlivňuje přibližně stejně jak měření hodnot globální radiace, tak trvání doby slunečního svitu. Z tohoto důvodu jsou metody používající sluneční svit jako prediktor daleko méně ovlivňovány znečištěním atmosféry než metody založené na ostatních meteorologických prvcích, zejména denních extrémech teploty. Toto tvrzení je podpořeno i skutečností, že rurální stanice (např. Kuchařovice a Gross-Enzessdorf) vykazují obdobné nebo nižší hodnoty MBE než metoda Angström-Prescottova (Prescot, 1940). Pokud je použita rovnice (1), pohybuje se hodnota průměrné roční MBE od  $-1,21$  do  $1,56 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , což je srovnatelný výsledek, jaký byl uveřejněn autory metody pro pět stanic, na nichž byla tato metoda vyvinuta. Thornton a Running, autoři rovnice (2), uvádějí hodnotu  $0,51 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$  pro lokality, kde byla metoda původně parametrizována a v rozmezí  $-1,26$  až  $0,68 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$  pro 13 stanic s nadmořskou výškou menší než 600 m n. m.

z celkového počtu 27 testovaných v podmínkách Rakouska (Thornton *et al.*, 2000). V porovnání s touto prací vykazují presentované výsledky (zhrnující sedm nových stanic) hodnotu MBE v intervalu  $-0,92$  do  $1,21 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ .

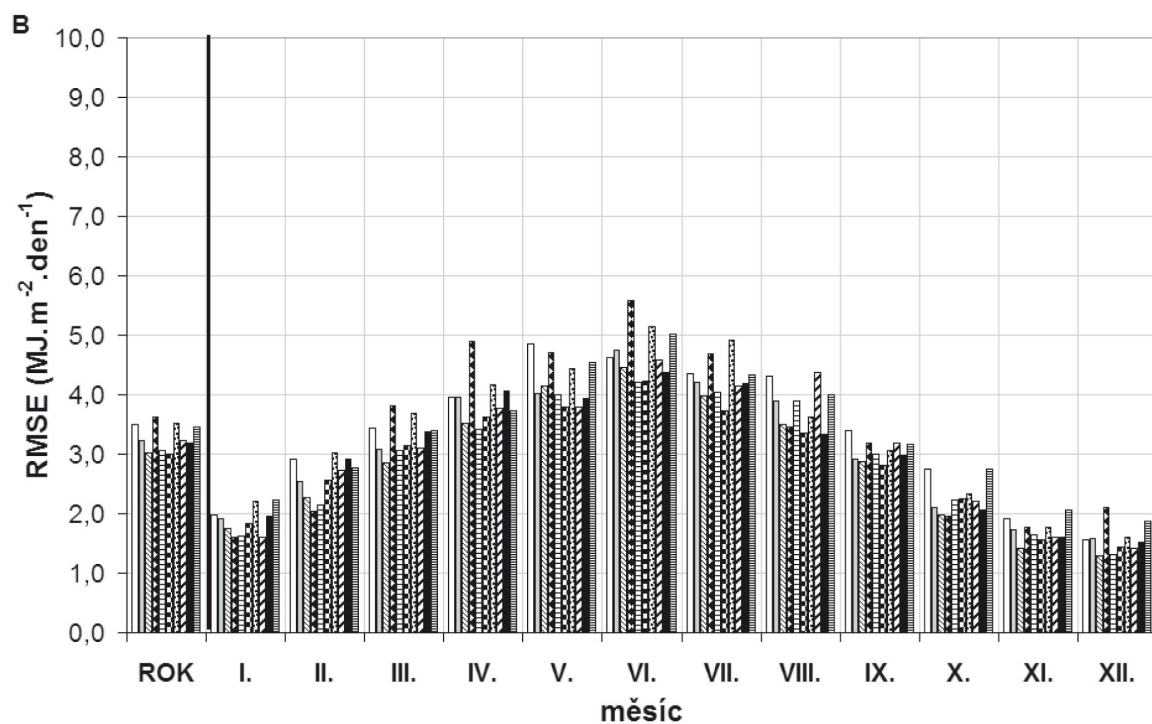
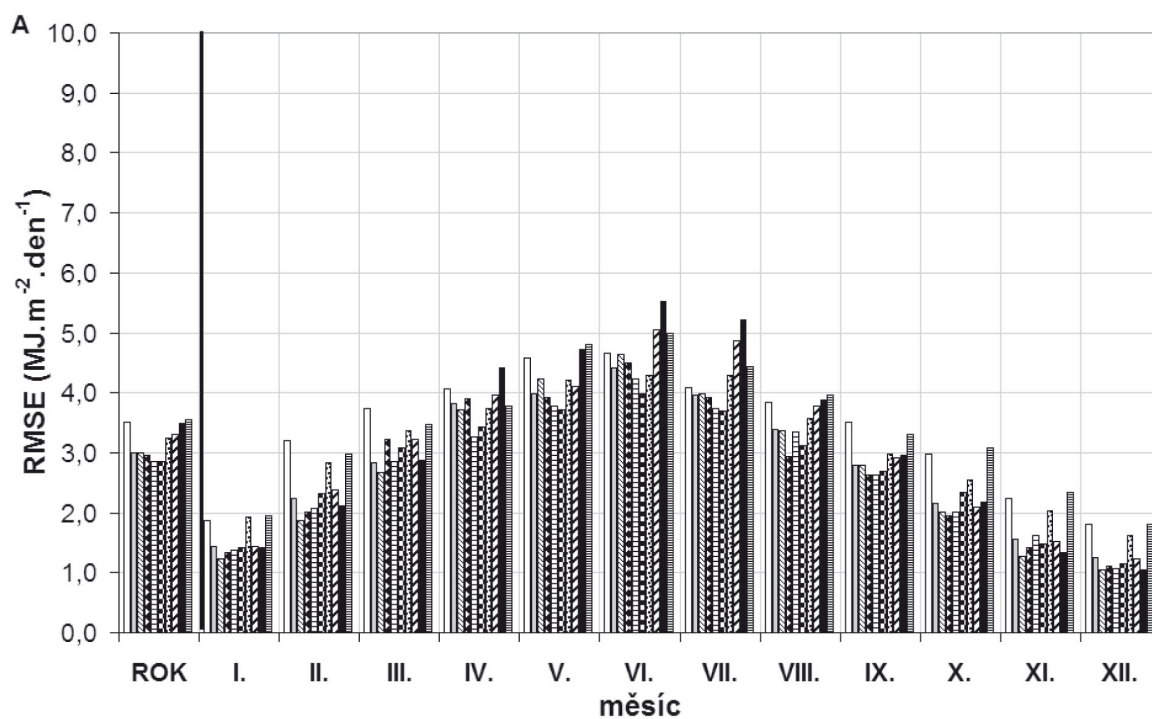
Kumulativní frekvence hodnot RMSE (Obr. 3b) se v rámci databáze pro rovnice (1) a (2) významně neliší. Nicméně obdobně jako v případě kumulativní frekvence MBE (Obr. 3a), rovnice (1) vykazuje lepší výsledky než druhá testovaná metoda. Zatímco v případě aplikace rovnice (1) bylo 90 % hodnot vypočteno s RMSE menší než  $5,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , při použití rovnice (2) byla odchylka zahrnující stejnou část databáze o  $0,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$  větší. Průměrná denní hodnota RMSE vypočtená ze všech 41 640 pozorovacích dní odpovídala v případě rovnice (1)  $3,09 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , tj. 28,9 %, a v případě rovnice (2)  $3,21 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , tj. 29,7 % (Tab. II). Z porovnání hodnot RMSE pro obě testované metody a výsledků získaných aplikací klasické Angström-Prescottovy metody vyplývá, že hodnota RMSE je u metod založených na použití denních extrémů teplot a úhrnu srážek přibližně dvojnásobná. I když mezistaniční porovnání roční průměrné hodnoty RMSE vede k závěru, že tyto rozdíly jsou poměrně malé, s hodnotou standardní odchylky  $0,21$ , resp. do  $0,27 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Obr. 5 dokládá jak výrazný roční chod hodnot RMSE, tak i existenci mezistaničních rozdílů, které jsou v absolutních číslech nejvýraznější během června a července, kdy rozdíl v hodnotě RMSE (vyjadřující náhodnou chybu) přesáhl  $1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Jak dokumentuje Obr. 4b, relativní hodnota RMSE je naopak nejnížší v letních měsících a obě použité metody ukazují naprosto srovnatelné výsledky. V měsících prosinci a lednu vykazuje rovnice (1) hodnoty RMSE o 12–18 % menší než rovnice (2), což i přes celkové nízké denní sumy  $R_G$  v tomto měsíci představuje výrazné zlepšení. Celková hodnota relativní RMSE pak kolísá v jednotlivých měsících v rozmezí 20,6 % až 50,4 % v případě rovnice (1) a v intervalu 22,4 % až 71,6 % v případě rovnice (2). Zmíněné hodnoty RMSE zjištěné pro rovnici (1) ( $3,09 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , tj. 28,6 %) a (2) ( $3,21 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ , tj. 29,7 %) se mohou jevit příliš vysoké, zvláště v porovnání s prací De Jonga a Stewarta (2003). Autoři uvedené práce navrhli metodu vycházející ze stejných prediktorů jako metody testované v této studii, přičemž hodnota relativní RMSE činila pouze 10,7 % v červenci a 15,7 % v listopadu. Těchto výsledků však bylo možné dosáhnout pouze díky parametrizaci uvedené metody s pomocí naměřených dat  $R_G$ , s jejichž pomocí byly stanoveny místně specifické empirické koeficienty, a to pro každou stanici a každý měsíc v roce. Již dříve zmíněná australská studie (Liu a Scott, 2001) sice přinesla metodu umožňující odhad  $R_G$  s menší hodnotou RMSE než obě v této práci testované metody, nicméně rozdíl je v tomto



3: Porovnání kumulativní četnosti pro (A) denní průměrnou odchylku (MBE), resp. (B) odmocninu průměrné kvadratické chyby (RMSE) pro obě porovnávané metody, na základě dat z deseti použitých stanic



4: Roční a měsíční hodnoty (A) MBE a (B) RMSE pro obě porovnávané metody jako průměr získaný na základě dat ze všech použitých lokalit



5: Srovnání ročních a měsíčních hodnot RMSE na deseti použitých stanicích pro obě testované metody (A) Winslow et al. 2001; (B) Thornton a Running, 1999

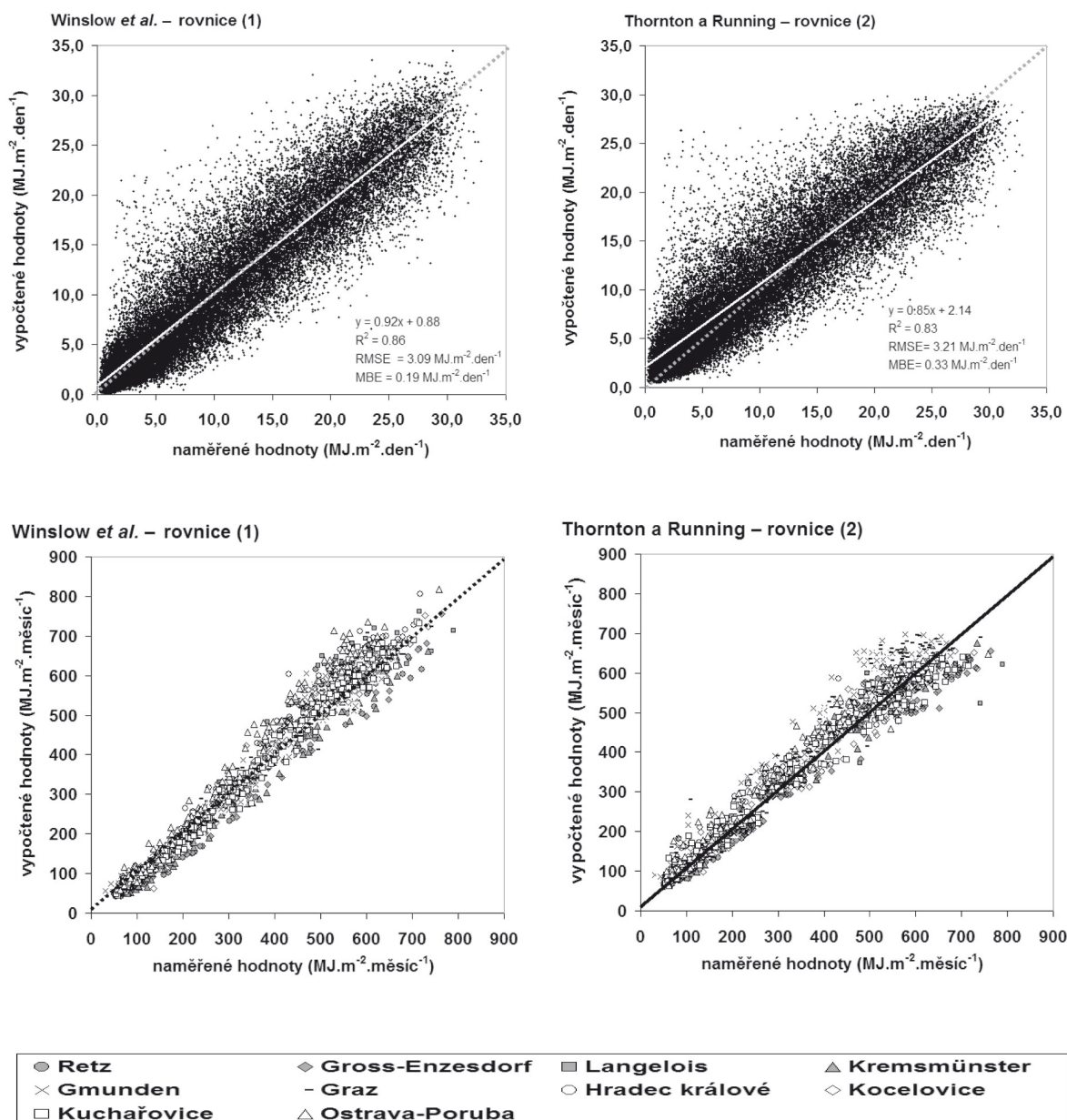
případě relativně malý. Publikované výsledky totiž ukazují na nesystematickou chybu v intervalu 2,23 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> až 3,49 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> pro 39 stanic zahrnutých do studie (jedná se o roční průměrné hodnoty RMSE na jednotlivých stanicích). Na rozdíl od rovnic (1) a (2) vyžaduje i tato metoda lokální parametrizaci s použitím měřených hodnot  $R_G$ . Výsledky získané s použitím rovnice (1) pro oblast střední Evropy překvapivě dobře korespondují (Tab. II) s originálními výsledky získanými pro pět stanic, na nichž byla tato metoda odvozena, kdy se hodnota RMSE v roční průměru pohybovala v rozmezí od 2,46 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> až po 4,41 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>.

Detailně lze chování obou modelů ve vztahu k denním a měsíčním hodnotám  $R_G$  posoudit na Obr. 6. Hodnoty denních dat v žádném případě neleží na linii 1:1, s čímž souvisí relativně vysoké hodnoty RMSE. Nicméně u rovnice (1) zachycené na Obr. 6a lze ze vztahu regresní přímky a linie 1:1 usuzovat, že tato metoda relativně spolehlivě pracuje jak pro dny s vysokou, tak s nízkou sumou  $R_G$ . Naopak rovnice (2) ve dnech s nízkou hodnotou  $R_G$  vypočtenou denní sumu globální radiace nadhodnocuje a naopak (Obr. 6b). V případě měsíčních sum (Obr. 6c,d) jsou patrné znatelně lepší výsledky rovnice (1), i když v měsících s hodnotou  $R_G$  větší než 500 MJ.m<sup>-2</sup>.měsíc<sup>-1</sup> má tato metoda sklon k nadhodnocování vypočtených hodnot v porovnání se skutečností. Tento jev úzce souvisí s výraznou dominancí náhodné chyby nad chybou systematickou. Rovnice (1) rovněž umožňuje výpočet  $R_G$  zatížené menší chybou než metoda substituce chybějících hodnot daty ze sousední stanice za předpokladu, že vzdálenost mezi stanicemi je větší než 80 km (Trnka *et al.*, 2003). Důvody nadhodnocování vypočtených hodnot pro dny s relativně nízkým úhrnem  $R_G$  a podhodnocování v případě dnů s vyšší hodnotou  $R_G$ , které se do jisté míry projevuje u obou použitých metod, spočívá s největší pravděpodobností v samotné podstatě obou metod a mohly by být blíže konkretizovány na základě analýzy hodinových dat, která však nebyla pro účely této studie k dispozici.

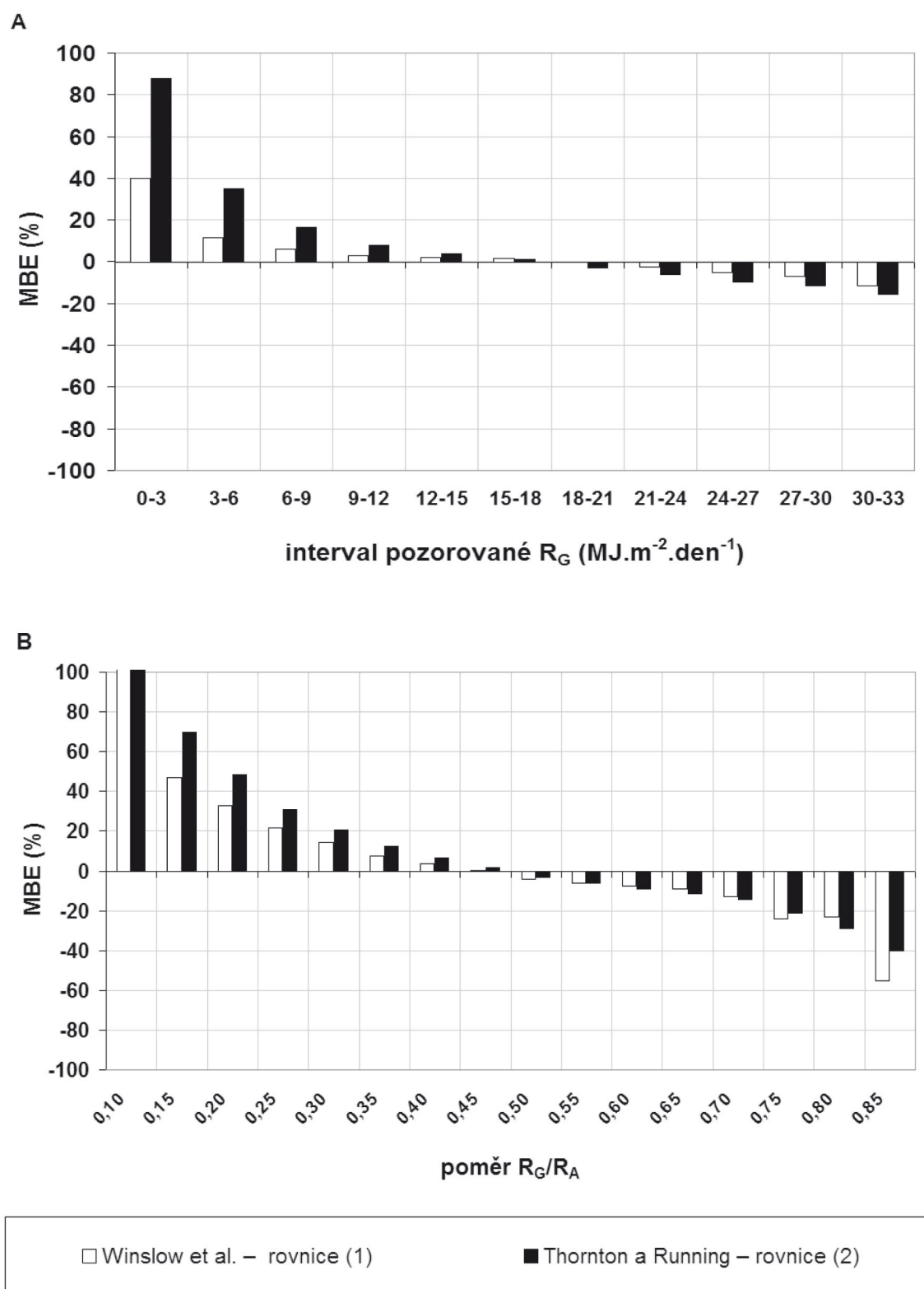
Pro názornější posouzení chování obou metod během dnů s různou hodnotou  $R_G$  byla použita jako indikátor relativní hodnota MBE. Obr. 7a jasně ukazuje, že obě metody nadhodnocují vypočtenou hodnotu  $R_G$  v porovnání s měřenými daty během dnů s úhrnem globální radiace v intervalu 0,1–9,0 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>, a to v případě rovnice (1) o 6,0 až 40 % a u rovnice (2) dokonce o 16,5 % až 88,0 %. U dnů s hodnotou  $R_G$  větší než 24,1 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> vykazují obě metody tendenci k podhodnocení denní sumy  $R_G$ . Význam tohoto zjištění spočívá zejména v tom, že celých 49,6 %

ze všech pozorovacích dnů v databázi náleží do skupiny dní s hodnotou  $R_G$  menší než 9,0 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> a 8,1 % naopak do skupiny dní s hodnotou  $R_G$  větší 24,1 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>, což zčásti vysvětluje celkové nadhodnocování hodnot  $R_G$  s ohledem na vyšší četnost výskytu nižších hodnot  $R_G$  (viz. Obr. 2a). Na základě Obr. 7a je také možné konstatovat, že obě metody jsou nejspolehlivější (ve smyslu poskytování nestranného odhadu  $R_G$ ) během dnů s hodnotou  $R_G$  od 9,1 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> do 24,0 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>. Zejména výsledky rovnice (2) pro dny se sumou globální radiace menší než 6,0 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> jsou problematické, zvláště pokud uvážíme, že hodnota relativní RMSE přesahuje 100 %. Taková nepřesnost odhadu hodnot  $R_G$  by samozřejmě velmi negativně ovlivnila uplatnění těchto metod v následných aplikacích. Detailní rozbor databáze ovšem zároveň prokázal, že takřka 85 % dní s denní sumou  $R_G$  menší než 9,0 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup> spadá do období od října do března, což znamená, že obě metody (a zejména rovnice (1)) jsou velmi dobře aplikovatelné na území střední Evropy v průběhu hlavního vegetačního období (tj. na sledovaných lokalitách měsíce duben až září). V těchto měsících je pro použitelnost obou metod pro konkrétní účel významné jejich chování během dnů s hodnotami  $R_G$  většími než 24 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>.

Výše uvedená analýza byla následována detailním porovnáním chování obou metod při různých hodnotách transmisivity, kdy byla propustnost atmosféry v jednotlivých dnech posuzována pomocí poměru  $R_G/R_A$  (Obr. 7b). Obecně lze konstatovat, že dny s hodnotou tohoto poměru blízké nule odpovídají dnům s nízkou transmisivitou, která je převážně ovlivněna oblačností, zatímco u hodnot blízkých jedné lze hovořit o jasných dnech (oblačnost < 0,2) či dnech s výskytem pouze vysokých oblaků (zejména cirrus a cirrocumulus), které mohou za jistých okolností zvyšovat hodnoty naměřené  $R_G$  prostřednictvím aerosolového rozptylu. Z obrázku je zřejmé, že obě metody dosahují uspokojivých výsledků během dní s hodnotou poměru v rozmezí 0,45–0,55. Při hodnotách poměru 0,25–0,70 se MBE pohybuje v rozmezí ±20 %, přičemž zejména při nízkých hodnotách poměru  $R_G/R_A$  se výrazně projevují přednosti rovnice (1). Během dnů s krajními hodnotami poměru úspěšnost obou metod výrazně klesá a hodnoty MBE mohou překročit i 100 %. Uvedená analýza ukázala, že obě metody jsou nespolehlivé při nízkých, resp. vysokých hodnotách poměru  $R_G/R_A$ , tedy že žádná z uvedených metod není použitelná během dnů s velmi nízkou či naopak velmi vysokou transmisivitou atmosféry.



6: Denní (A,B) a měsíční sumy (C,D) globální radiace naměřené vs. vypočtené s využitím rovnice (1) – Winslow et al., 2001 (A,C) a rovnice (2) – Thornton a Running, 1999 (B,D) pro všechny pozorovací dny (měsíce) v databázi jsou vyneseny v bodovém grafu. Prerušovaná čára značí přímku 1:1; nepřerušovaná čára (A,B) představuje lineární regresní přímkou. Šedě vyplněné symboly (C,D) označují rakouské stanice.



7: Hodnoty denní průměrné odchylky (MBE) pro (A) definované intervaly podle denní sumy naměřené  $R_G$  (Obr. 2a) a (B) v průběhu dní různou hodnotou poměru naměřené  $R_G$  a  $R_A$  (Obr. 2b)

## SOUHRN

V rámci této práce byly testovány dvě metody odhadu denní globální radiace s použitím hodnot teplotních extrémů a denního úhrnu srážek. Všechny parametry nezbytné pro aplikaci obou metod byly odvozeny z literatury, případně na základě běžně dostupných dlouhodobých klimatických charakteristik pro jednotlivé meteorologické stanice. Je nutné zdůraznit, že pro parametrizaci metod nebyly použity měřené hodnoty  $R_G$ . K otestování obou metod byla sestavena databáze zahrnující deset meteorologických stanic na území České republiky a Rakouska obsahující celkem 41 640 pozorovacích dní, pro které byly k dispozici hodnoty pozorované denní sumy  $R_G$ , denní maximální a minimální teplota a úhrn srážek. Obě metody byly srovnávány s pomocí koeficientu determinace, hodnoty směrnice regresní přímky, průměrné odchylky (MBE) a odmocniny průměrné kvadratické chyby (RMSE). Metoda navržená Winslowem *et al.* (rovnice (1)) je schopná vysvětlit 86 % variability pozorovaných denních hodnot  $R_G$ , přičemž hodnota systematické chyby v ročním průměru vyjádřená jako MBE činí  $0,19 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$  a průměrná velikost nesystematické chyby vyjádřená hodnotou RMSE ve stejném období činí  $3,09 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$ . Výpočty s použitím metody publikované Thorntonem a Runningem (rovnice (2)) jsou zatíženy větší systematickou i nesystematickou chybou, a proto lze pro území střední Evropy (do nadmořské výšky 600 m n. m.) doporučit rovnici (1). I když hodnoty relativní MBE během některých měsíců překračují 10 % a hodnoty RMSE přesahují 30 %, lze rovnici (1) doporučit pro odhad denních a měsíčních sum  $R_G$  pro stanice, na nichž nejsou k dispozici měřené hodnoty  $R_G$ , slunečního svitu případně oblačnosti, které umožňují přesnější určení hodnot  $R_G$ .

globální sluneční radiace, empirické modely

Poděkování: Tato studie byla uskutečněna s finanční podporou projektu Grantové Agentury ČR č. 521/03/D059. Práce by nebyla možná bez datové podpory ze strany Českého hydrometeorologického ústavu (zejména Ozónové a solární observatoře v Hradci Králové) a Rakouské meteorologické služby (ZAMG). Poděkování patří i Jerome C. Winslowovi a Peter E. Thorntonovi za poskytnutí dodatečných informací a předběžnou kontrolu autorových výpočtů.

## LITERATURA

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M.: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements., Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 1998, 300 pp.
- ALMEIDA, A. C., LANDSBERG, J. J.: Evaluating methods of estimating global radiation and vapor pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil, *Agric. For. Meteorol.*, 2003, 118, 237-250
- ANGSTÖM, A.: Solar and terrestrial radiation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 50, 1924, 121-125
- BRISTOW, K., CAMBELL, G. S.: On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature, *Agric. For. Meteorol.*, 1984, 52, 275-286
- DAVIES, J. A., MCKAY, D. C.: Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces, *Solar Energy*, 1989, 43, 3, 153-168
- De JONG, R., STEWART, D. W.: Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada, *Can. J. Plant. Sci.*, 1993, 73, 509-518
- DONATELLI, M., CAMBELL, G. S.: A simple method to estimate global radiation, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> ESA conference*, Nitra, 1998, 133-134
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York, 1980, 109 pp.
- FROLICH, C.: Observations of the solar constant and its variations – a summary. In : Boulder CO (Ed.) A collection of extended abstracts presented at the symposium on the solar constant and the distribution of solar irradiance. Source: Burman R & Pochop LO (1994) *Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Developments in Atmospheric science* 22. Elsevier, Amsterdam, 1982, 278 pp.
- GUEYMARD, C. A.: The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models, *Solar Energy*, 2003, (in print)
- KASTEN, F., CZEPLAK, G.: Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, *Solar Energy*, 1980, 177-189
- KLABZUBA, J., BUREŠ, R., KOŽNAROVÁ, V.: Model výpočtu denních sum globálního záření pro použití v růstových modelech, *Proceedings of the "Bioklimatologické pracovní dny 1999 Zvolen"*, 1999, 121-122
- LINDSEY, S. D., FARNSWORTH, R. K.: Sources of

- solar radiation estimates and their effect on daily potential evaporation for use in streamflow modeling, *J.Hydrol.*, 1997, 201, 348-366
- LLASAT, M. C., SNYDER, R. L.: Data error effect on net radiation and evapotranspiration estimation, *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 91, 209-221
- LIU, D. L., SCOTT, B. J.: Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations, *Agric. For. Meteorol.*, 2001, 106, 41-59
- OESTERLE, H.: Reconstruction of Daily Global Radiation for Past Years for use in Agricultural Models, *Phys. Chem. Earth*, 2001, 26, 3, 253-256
- PRESCOTT, J. A.: Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. South Australia*, 1940, 64, 114-118
- SUPIT, I., van KAPPEL, R. R.: A simple method to estimate global radiation, *Solar Energy*, 1998, 63, 147-160
- THORNTON, P. E., HASENAUER, H., WHITE, M. A.: Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria, 2000, 104, 255-271
- THORNTON, P. E., RUNNING, S. W.: An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation, *Agric. For. Meteorol.*, 1999, 93, 211-228
- THORNTON, P. E., RUNNING, S. W., WHITE, M. A.: Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain, *J.Hydrol.*, 1997, 190, 214-251
- TRNKA, M., EITZINGER, J., KAPLER, P., ŽALUD, Z., FORMAYER, H., DUBROVSKÝ, M., SEMERÁDOVÁ, D.: Comparison of various methods for estimating daily global solar radiation, *Bioklimatologické pracovní dny Račková Dolina 2003: s.6, plné znění CD ROM2003*, ISBN 80-8069-244-0
- VANÍČEK, K.: Použití nepřímých výpočetních metod k určení některých základních charakteristik pole slunečního záření, *Meteorologické zprávy*, 1985, 38, 72-75
- WINSLO, J. C., HUNT, E. R., PIPER, S. C.: A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data, *Ecol. Modelling*, 2001, 143, 227-243
- ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M.: Modelling climate change impacts on maize growth and development *Theor Appl Climatol* 72, 2002, 1 – 2, 85-102

## Adresa

Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D., Ústav krajinné ekologie, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: mirek\_trnka@yahoo.com

